



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava



SPOLEHLIVOST A DIAGNOSTIKA

učební text

Milan Vrožina, Jiří David

Ostrava 2012

Recenze: prof. Ing. F. Němec, CSc.
RNDr. Miroslav Liška, CSc.

Název: Spolehlivost a diagnostika
Autor: M. Vrožina – J. David
Vydání: první, 2010
Počet stran: 98
Náklad: 20

Studijní materiály pro studijní obory B3922. Automatizace a počítačová technika v průmyslu
a B3922 Management jakosti, Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
Jazyková korektura: nebyla provedena.

Určeno pro projekt:

Operační program Vzdělávání pro konkurenceschopnost
Název: Personalizace výuky prostřednictvím e-learningu
Číslo: CZ.1.07/2.2.00/07.0339
Realizace: VŠB – Technická univerzita Ostrava
Projekt je spolufinancován z prostředků ESF a státního rozpočtu ČR

© M. Vrožina – J. David
© VŠB – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-2595-3

POKYNY KE STUDIU

Spolehlivost a diagnostika

Pro předmět 5. semestru oboru B3922. Automatizace a počítačová technika v průmyslu, FMMI a B3922 Management jakosti, FMMI jste obdrželi studijní balík obsahující

- integrované skriptum pro distanční studium obsahující i pokyny ke studiu
- CD-ROM s doplňkovými animacemi vybraných částí kapitol
- harmonogram průběhu semestru a rozvrh prezenční části
- rozdělení studentů do skupin k jednotlivým tutorům a kontakty na tutorů
- kontakt na studijní oddělení

Prerekvizity

Předmět nemá žádné prerekvizity.

Cílem předmětu

Je probírána teorie spolehlivosti neobnovovaných a obnovovaných objektů. Ve smyslu norem ISO je spolehlivost chápána jako pohotovost a činitelé, které ji ovlivňují, a to především bezporuchovost, udržitelnost a zabezpečení údržby. Jsou přednášeny metody zvyšování spolehlivosti, problematika zabezpečování nápravné údržby, preventivní údržby a metod její optimalizace. Pozornost je věnována zavádění komplexní produktivní údržby. Dále jsou probrány otázky diagnostických metod a užití prvků umělé inteligence při jejím provádění.

Studenti budou umět analyzovat výrobní procesy z hlediska zvyšování spolehlivosti koncepčními i technickými opatřeními. Posluchači budou kompetentní se v procesu rozhodování podílet na návrzích, realizacích i provozování techniky pro zvyšování spolehlivosti a kvality výroby.

Pro koho je předmět určen

Modul je zařazen do bakalářského studia oboru B3922. Automatizace a počítačová technika v průmyslu, FMMI studijního programu 3902R040 a do bakalářského studia oboru B3922 Management jakosti, FMMI studijního programu 3902R041, ale může jej studovat i zájemce z kteréhokoliv jiného oboru.

Skriptum se dělí na části, kapitoly, které odpovídají logickému dělení studované látky, ale nejsou stejně obsáhlé. Předpokládaná doba ke studiu kapitoly se může výrazně lišit, proto jsou velké kapitoly děleny dále na číslované podkapitoly a těm odpovídá níže popsaná struktura.

Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup:



Čas ke studiu: xx hodin

Na úvod kapitoly je uveden **čas** potřebný k prostudování látky. Čas je orientační a může vám sloužit jako hrubé vodítko pro rozvržení studia celého předmětu či kapitoly. Někomu se čas může zdát příliš dlouhý, někomu naopak. Jsou studenti, kteří se s touto problematikou ještě nikdy nesetkali a naopak takoví, kteří již v tomto oboru mají bohaté zkušenosti.



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat ...
- definovat ...
- vyřešit ...

Okamžitě potom jsou uvedeny cíle, kterých máte dosáhnout po prostudování této kapitoly – konkrétní dovednosti, znalosti.



VÝKLAD

Následuje vlastní výklad studované látky, zavedení nových pojmů, jejich vysvětlení, vše doprovázeno obrázky, tabulkami, řešenými příklady, odkazy na animace.



Shrnutí pojmů

Na závěr kapitoly jsou zopakovány hlavní pojmy, které si v ní máte osvojit. Pokud některému z nich ještě nerozumíte, vraťte se k nim ještě jednou.



Otázky

Pro ověření, že jste dobře a úplně látku kapitoly zvládli, máte k dispozici několik teoretických otázek.



Úlohy k řešení

Protože většina teoretických pojmů tohoto předmětu má bezprostřední význam a využití v databázové praxi, jsou Vám nakonec předkládány i praktické úlohy k řešení. V nich je hlavní význam předmětu a schopnost aplikovat čerstvě nabyté znalosti při řešení reálných situací hlavním cílem předmětu.



KLÍČ K ŘEŠENÍ

Výsledky zadaných příkladů i teoretických otázek výše jsou uvedeny v závěru učebnice v Klíči k řešení. Používejte je až po vlastním vyřešení úloh, jen tak si samokontrolou ověříte, že jste obsah kapitoly skutečně úplně zvládli.

Úspěšné a příjemné studium s touto učebnicí Vám přeji autoři výukového materiálu

Milan Vrožina a Jiří David

OBSAH

1. VYMEZENÍ POJMŮ JAKOST A SPOLEHLIVOST	7
1.1. Jakost a spolehlivost	7
1.2. Spolehlivost a technický život objektu	11
1.3. Klasifikace objektů a systémů	17
2 KLASIFIKACE PORUCH	20
3 PRAVDĚPODOBNOSTNÍ A STATISTICKÉ UKAZATELE SPOLEHLIVOSTI	23
3.1. Pojmy teorie pravděpodobnosti a statistiky	23
4 UKAZATELE SPOLEHLIVOSTI NEOBNOVOVANÝCH OBJEKT 30	30
4.1. Statistické určování spolehlivostních ukazatelů bezporuchovosti	30
4.2. Pravděpodobnostní definice ukazatelů bezporuchovosti	40
4.3. Rozdělení pravděpodobnosti ukazatelů spolehlivosti systémů	42
4.4. Ukazatele životnosti, bezpečnosti a skladovatelnosti	48
5 SPOLEHLIVOST OBNOVOVANÝCH OBJEKTŮ	50
5.1. Ukazatele spolehlivosti obnovovaných objektů	50
6 ZKOUŠKY SPOLEHLIVOSTI	57
6.1. Matematický aparát zkoušek spolehlivosti	57
6.2. Rozdělení a příprava zkoušek spolehlivosti	60
7 HODNOCENÍ SPOLEHLIVOSTI SYSTÉMŮ	63
7.1. Spolehlivostní modely systémů	63
7.2. Spolehlivostní modely vyjádřené pomocí blokových schémat	65
7.3. Spolehlivostní modely v podobě vzájemně odlišných stavů systémů	73
7.4. Markovovy spolehlivostní modely	77
7.5. Metody statistického modelování	81
8 ZVYŠOVÁNÍ SPOLEHLIVOSTI SYSTÉMŮ	85
8.1. Pasivní způsoby zvyšování spolehlivosti	85
8.2. Hardwarová nadbytečnost - zálohování	85
8.3. Problémy softwarové spolehlivosti	88
9 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA	90
10 UDRŽOVATELNOST A ZABEZPEČENÍ ÚDRŽBY	93
10.1. Údržba	93
10.2. Komplexní produktivní údržba	94
Literatura	99

1. VYMEZENÍ POJMŮ JAKOST A SPOLEHLIVOST

1.1. Jakost a spolehlivost



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat pojmy jakost a spolehlivost, bezporuchovost, udržitelnost, pohotovost, zajištěnost údržby, skladovatelnost, životnost, bezpečnost
- popsat vlastnosti jakosti, vlastnosti spolehlivosti



Výklad

Donedávna se v podmínkách našich podniků při výrobě kladl důraz především na množství, popřípadě na splnění základních technických parametrů, které byly nezbytné pro funkční vlastnosti daného výrobku. Problematika jakosti a spolehlivosti byla ve většině případů podceňována nebo úplně opomíjena. Výrobky a systémy takto vyráběné velmi často vyžadují při svém užívání nákladnou údržbu, časté opravy, některé se dokonce předčasně vyřazují pro nerentabilní nebo dokonce nebezpečný provoz. Z toho vyplývají značné ekonomické ztráty a mnohdy i nebezpečí ohrožení zdraví či života. Přitom zkušenosti ukazují, že naopak při důsledném řešení problematiky spolehlivosti dochází u výrobců ke zlepšení jejich hospodářských výsledků.

Odpovídající vysoká spolehlivost při široké nabídce mnoha firem bývá jedním z podstatných činitelů konkurenceschopnosti výrobku, spoluvytváří dobré jméno výrobce, které je pro uživatele i určitou zárukou.

Modelovým příkladem je cesta k prosperitě japonských výrobců. Zhruba v 60. letech se japonští výrobci začali velmi důsledně zaměřovat na jakost a tedy i na spolehlivost. Časem se přesvědčili, že investice do péče o jakost je investice s vysokou návratností, přestože se efekt nedostavuje bezprostředně. Zisk se dostaví za delší dobu, mnohdy až za několik let, ale je vysoký a déle trvající.

Proto snaha o zvyšování spolehlivosti prvků a systémů je v technické praxi stále aktuální. Pouze správné pochopení této problematiky je jedinou cestou k produkci výrobků s takovými parametry, které budou schopny uspokojovat všechny požadavky uživatele.

Pojem jakosti vymezuje norma ČSN ISO 8402:

Jakost je souhrn znaků entity, které ovlivňují schopnost uspokojovat stanovené nebo předpokládané potřeby (entitou se rozumí výrobek, technické zařízení, služba atd.).

Pojem spolehlivosti vymezuje norma ČSN ISO 84022 a ČSN IEC 50 (191):

Spolehlivost je termín pro popis pohotovosti a činitelů, které ji ovlivňují tj. bezporuchovosti, udržitelnosti a zajištěnosti údržby.

S ohledem na existující literaturu je vhodné se zmínit o definici dle ČSN platné do roku 1993:

Spolehlivost je vlastnost objektu spočívající ve schopnosti plnit požadované funkce při zachování hodnot stanovených provozních ukazatelů v daných mezích a v čase podle stanovených podmínek.

Jedná se o definice, které mají obecný a výsledný charakter. Pro jejich další objasnění je třeba užít řady funkčních definic [1].

Jakost výrobků je tvořena řadou dílčích vlastností, které označujeme jako znaky jakosti. Mezi nejdůležitější patří:

- technické a funkční vlastnosti,
- spolehlivost,
- materiálová a energetická náročnost,
- technologičnost,
- ekologické vlastnosti,
- ergonomické vlastnosti,
- estetické vlastnosti,
- jiné vlastnosti (dopravitelnost, normalizace a pod.).

Jednotlivé znaky jakosti mají svůj vnitřní obsah podle kterého se dají rozčlenit na znaky technické, provozní, ekonomické, estetické, atd.

Kvantitativní vyjádření jednoho nebo několika znaků označujeme jako ukazatel jakosti výrobku. Jakost výrobku sledujeme v průběhu jeho vzniku, jeho technického života, případně i v období jeho likvidace. Pak hovoříme o jakosti návrhu, jakosti výrobního provedení, jakosti dodavatelsko odběratelských vztahů, jakosti používání atd. Činnosti ovlivňující jakost ve všech fázích existence výrobků vyjadřujeme tzv. spirálou jakosti. Při zabezpečování jakosti mají významnou úlohu normalizační organizace ISO (International Organization of Standardization) a IEC (International Electrotechnical Commission). Přístup k zabezpečování jakosti dle norem těchto organizací je charakterizován následujícími pojmy:

- strategie jakosti (quality policy):

Vytyčení podnikových záměrů pro dosažení a udržení jakosti výroby.

- manažerské řízení jakosti (quality management):

Řídící činnost vedoucích pracovníků pro naplnění podnikové strategie při zajišťování jakosti.

- systém řízení jakosti (quality system):

Organizační struktura, postupy, zdroje, spojené se zavedením vytýčené úrovně jakosti do praxe.

- řízení jakosti (quality control):

Technická opatření zaměřená na dodržení jakosti tj. měření, diagnostika, odstranění neuspokojivého průběhu procesů automatizací a další řešení zabezpečující jakost ve všech fázích technického života výrobku.

- zabezpečování jakosti (quality assurance):

Činnosti spojené s prokázáním dodržování stanovené jakosti vlastní organizací i zákazníkovi.

Spolehlivost je s přihlédnutím k výše uvedeným definicím chápána jako komplexní vlastnost objektu. V praxi se často používá slovního spojení jakost a spolehlivost. Zdůrazňuje se tak význam spolehlivosti jako jedné z nejvýznamnějších dílčích vlastností jakosti. Jednotlivé vlastnosti spolehlivosti lze pak definovat:

- **pohotovost** - vlastnost objektu být ve stavu schopném plnit požadované funkce v daném časovém okamžiku a v daných podmínkách,
- **bezporuchovost** - schopnost objektu plnit nepřetržitě požadované funkce po stanovenou dobu a za stanovených podmínek,
- **udržovatelnost** - schopnost objektu v daných podmínkách používání setrvat ve stavu nebo se vrátit do stavu, v němž může plnit požadovanou funkci, jestliže se údržba provádí v daných podmínkách a používají se stanovené postupy a prostředky (zahrnuje i dřívější pojem opravitelnosti),
- **zajištěnost údržby** - schopnost příslušné organizace zajišťovat dle požadavků v daných podmínkách prostředky potřebné pro údržbu podle stanovené koncepce údržby,
- **skladovatelnost** - schopnost objektu zachovávat nepřetržitě bezvadný stav po dobu skladování a přepravy při dodržování předepsaných podmínek,
- **životnost** - schopnost objektu plnit požadované funkce do dosažení mezního stavu při stanoveném systému předepsané údržby a oprav; mezní stav objektu je stav, ve kterém musí být další využití objektu přerušeno; kritéria mezního stavu pro daný objekt stanoví technická dokumentace,
- **bezpečnost** - vlastnost objektu neohrožovat lidské zdraví nebo životní prostředí při plnění předepsané funkce po stanovenou dobu a za stanovených podmínek,



Obr. 1 Vztahy mezi jakostí, spolehlivostí a jejími dílčími vlastnostmi (znaky) výrobku [1].

Kvantitativní vyjádření jedné nebo několika dílčích vlastností spolehlivosti nazýváme ukazatel spolehlivosti.

U objektu je nutné určit, kterými ukazateli bude jeho spolehlivost popsána a pak zvolené ukazatele číselně vyjádřit.

Při řešení spolehlivosti objektů je nutno uplatňovat systémový přístup, kdy se hledá optimální způsob zabezpečování spolehlivosti ve všech fázích technického života objektu od jeho návrhu - spolehlivost včleněná do projektu, v období realizace objektu - inherentní spolehlivost, v období jeho provozu - provozní spolehlivost, případně i v období jeho likvidace. Pro řešení tohoto problému musí být vybudován informační systém zabezpečující systematické shromažďování údajů o spolehlivosti. Vodítkem může být norma ČSN ISO 9000-4 a ČSN IEC 300-1 týkající se řízení spolehlivosti stanovením programu pro řízení spolehlivosti.

Problematiku spolehlivosti je nutno současně řešit z hlediska technického, ekonomického i z hlediska organizačního zabezpečení.

Pro optimalizaci ekonomických hledisek se sledují náklady na životní cyklus ve všech výše uvedených fázích technického života objektu (LCC - Life Cycle Costs) a životní náklady sledující cenu za zabezpečení bezporuchovosti, udržitelnosti a zajištění údržby (LSC - Life Support Costs).



Shrnutí pojmů

Jakost, spolehlivost, pohotovost, bezporuchovost, životnost, skladovatelnost, udržitelnost, zajištění údržby



Otázky

1. Definujte pojem jakost a spolehlivost a uveďte vztah mezi nimi.
2. Vysvětlete dominantní postavení spolehlivosti mezi ostatními vlastnostmi jakosti.
3. Kterým termínem resp. vlastností je charakterizováno současné chápání spolehlivosti podle definice spolehlivosti dané normou ČSN IEC 50 (191).
4. Charakterizujte pohotovost a bezporuchovost a srovnajte je.

1.2. Spolehlivost a technický život objektu



Čas ke studiu: 1 hodinu



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat projektovanou spolehlivost, provozní spolehlivost, inherentní spolehlivost,
- popsat jednotlivá období technického života objektu,
- seznámíte se s příklady zákonů a nařízeními vlády, kterými stát vytváří tlak na úroveň spolehlivosti objektů.



Výklad

Spolehlivost je třeba chápat jako jednu z vlastností jakosti, proto je zabezpečování spolehlivosti nutno řešit jako součást zabezpečování jakosti. Potřeba řešit problematiku spolehlivosti systémově je dána její složitostí a některými zvláštnostmi řešení. Zde se projevují dvě důležité okolnosti:

a) každý objekt prochází během svého technického života třemi obdobími

- obdobím návrhu, kdy jsou vytvářeny předpoklady pro dosažení určité spolehlivosti. Hledá se řešení s požadovanou úrovní spolehlivosti při minimálních vynaložených nákladech ve všech obdobích technického života výrobku; hovoříme o tzv. **projektované spolehlivosti**
- obdobím realizace, kdy je nutné navrženou úroveň spolehlivosti realizovat; každý jednotlivý objekt tak získává svoji tzv. **inherentní spolehlivost**

- obdobím provozu, v němž je objekt používán ke stanovenému účelu; navrženou a realizovanou úroveň spolehlivosti je nutné udržovat; hovoříme o tzv. **provozní spolehlivosti**

b) problematiku spolehlivosti je nezbytné řešit z hlediska technického, ekonomického a organizačního.

Řešení problematiky spolehlivosti v jednotlivých obdobích technického života objektů se vzájemně prolíná a je nutno zabezpečit dopředné i zpětné vazby při současném uvažování vnějších vlivů, které spolehlivost ovlivňují (viz.obr.1,[1]).

Pro úspěšné řešení problematiky spolehlivosti je přesné vymezení pojmů, které v této oblasti používáme, zcela nezbytné. Vede to k jednoznačnosti zadání, postupů a interpretace mezivýsledků v průběhu řešení, ale taktéž k jednoznačnosti formulace i chápání výsledků a závěrů.

Výrobky a systémy uplatňující se ve všech oblastech průmyslu se liší ve svých funkčních vlastnostech, ve své struktuře i složitosti a pracují v různých provozních podmínkách. Tato různorodost a rozdílnost v praktických aplikacích vede k tomu, že se ukazatele spolehlivosti stanovují pro různé aplikace diferencovaně. Rovněž se liší teoretické metody a praktické postupy, kterými jsou tyto ukazatele zabezpečovány. Stejný je však přístup k volbě metod i praktickým postupům - uplatňuje se maximální využívání poznatků o spolehlivosti realizovaných výrobků a systémů v provozu a důsledné využívání systémového přístupu při realizaci nových systémů. Systémovým přístupem zde rozumíme zejména vytváření podmínek pro předcházení poruchám systémů v provozu a omezování nápravných opatření, která se obvykle provádějí až po poruchách a haváriích.

Pro stroje a zařízení budeme v dalším textu používat převážně obecnější názvy – systém, objekt a výrobek. Přitom předpokládáme následující strukturu výrobků, objektů a systémů:

- součástka - nejjednodušší samostatný prvek funkční jednotky, funkční jednotka (funkční blok) - dvě nebo více součástí, které v kombinaci plní specifickou funkci,
- podsystém - dvě nebo více funkčních jednotek, které v kombinaci plní specifickou funkci v rámci systému,
- systém - kombinace vzájemně propojených podsystémů a jejich příslušenství, která zajišťuje předepsanou cílovou funkci
- výrobek - kombinace jedné nebo více funkčních jednotek a příslušenství, propojených tak, aby plnily předepsané specifické funkce. Je to všeobecný název pro součástky a jednoduché struktury.

Inherentní spolehlivost

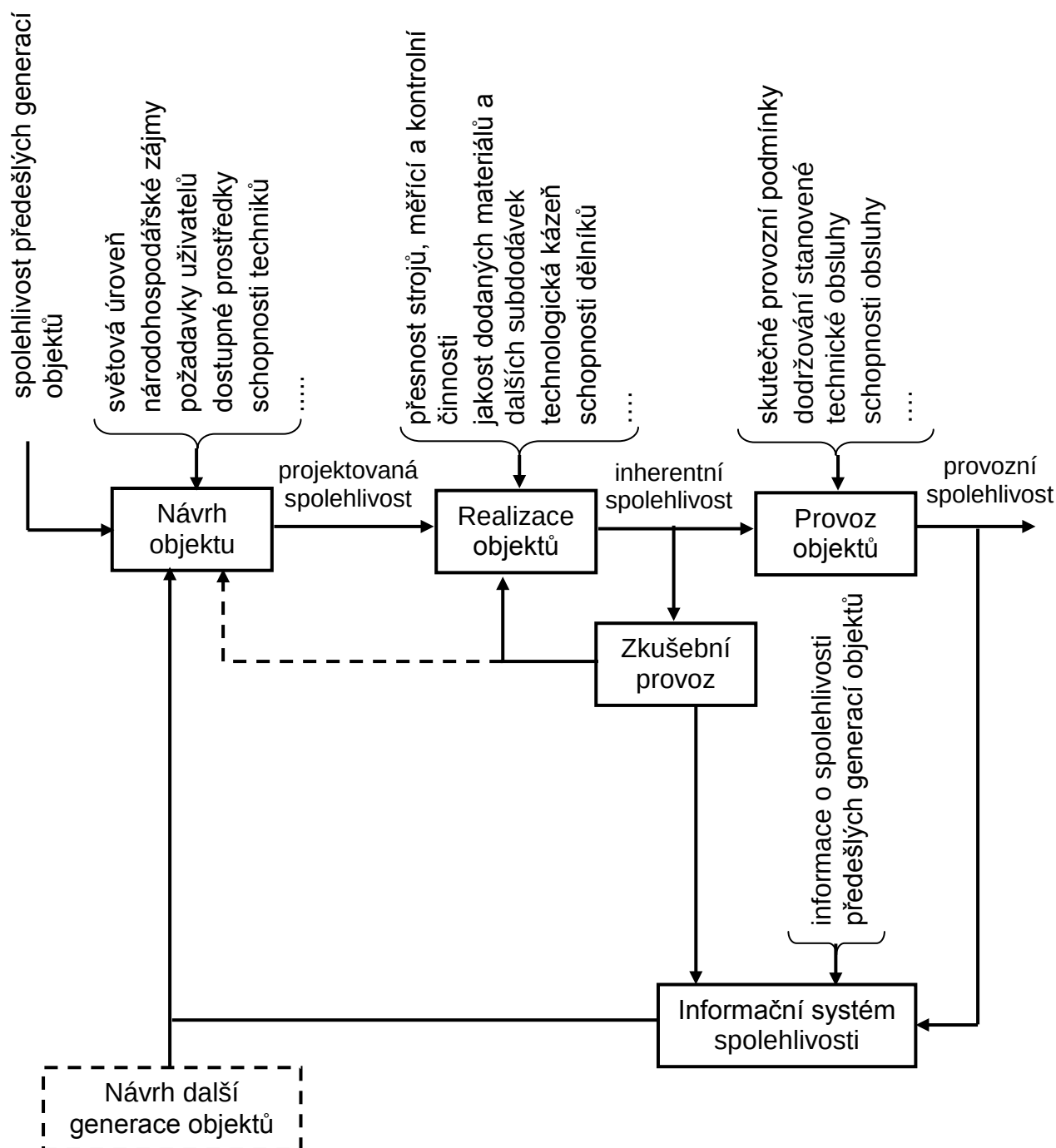
Inherentní (vlastní, vnitřní) spolehlivost výrobku jsou vlastnosti (v souladu s výše uvedenými definicemi) vyjadřující jeho schopnost plnit požadované funkce v čase, které jsou zajišťovány, ovlivňovány a do výrobků vloženy především v těchto sférách činnosti:

- marketing a definování požadavků na výrobek,
- navrhování (konstruování) a vývoj výrobku,
- technologické a výrobní procesy.

Abychom mohli prokazovat nebo ověřovat inherentní spolehlivost, musíme v co nejvyšší míře vyloučit vliv variability (proměnlivosti) provozních podmínek. Tedy inherentní spolehlivost můžeme prokazovat nebo ověřovat pouze ve „sterilním“ prostředí laboratoří a při pečlivém dodržení provozních a údržbářských režimů formou laboratorních zkoušek spolehlivosti.

I když management a používané systémy jakosti v této podnikové sféře něco vylepšily (zejména technologické a výrobní procesy), velmi zaostává fáze definování požadavků na spolehlivost, a to zejména v kvantitativní rovině. Většinou každé vrcholové vedení podniku si dává do své politiky a cílů jakosti vyrábět a prodávat pouze spolehlivé výrobky, ale již nevyžaduje další konkretizaci a rozpracování těchto cílů, a ani nevytváří a neposkytuje příslušné zdroje pro jejich splnění. Chybí kvantifikace požadovaných hodnot takových ukazatelů, jako je:

- střední doba do poruchy,
- střední doba mezi poruchami,
- střední užitečný život,
- střední doba údržby,
- součinitel ustálené pohotovosti,
- střední náklady životního cyklu aj.



Obr. 2 Etapy spolehlivosti v průběhu životního cyklu objektu [1]

Nejsou-li stanoveny požadované hodnoty těchto ukazatelů, nejsou vykonávány ani určovací a ověřovací laboratorní zkoušky. Mnoho podnikových laboratoří bylo zrušeno nebo silně redukováno. Zcela nebo částečně vyškolený personál pro zkoušky spolehlivosti se rozptýlil na jiná pracoviště a s jinou pracovní náplní. Má-li se podnik seriózně zabývat a řešit problémy spolehlivosti svých výrobků, musí mít v konstrukci s plnou nebo částečnou pracovní náplní inženýra pro spolehlivost a v laboratoři inženýra pro zkoušky spolehlivosti. Outsourcing (používání zdrojů mimo vlastní podnik)

v oblasti laboratorních zkoušek spolehlivosti je účelný pro malé podniky, ale ve velkých podnicích je třeba zvažovat vytvoření vlastních zdrojů. Současně je ovšem žádoucí podpořit vznik nových zkušebních pracovišť nebo alespoň udržet existující pracoviště laboratorních zkoušek spolehlivosti v různých zkušebnách. Jde o získávání objektivních hodnot ukazatelů spolehlivosti autorizovanou osobou nezávisle na výrobcí a zákazníkovi.

Tato opatření jsou jak v zájmu zákazníka, tak i celé společnosti. Zákazník by měl vytvářet tlak na řešení spolehlivosti kladením příslušných specifikací ukazatelů spolehlivosti požadovaného výrobku a vyžadováním objektivního prokázání nebo ověření třetí nezávislou osobou. Společnost (stát) vytváří tlak na spolehlivost a zejména pak bezpečnost výrobků různými zákony a vládními nařízeními, např.:

- zákonem 59/98 Sb. o odpovědnosti za škody způsobené vadou výrobku,
- zákonem 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky, jehož součástí jsou jednotlivá nařízení vlády:
 - č. 168/1997 Sb. Nařízení vlády, kterým se stanoví technické požadavky na elektrická zařízení nízkého napětí,
 - č. 169/1997 Sb. Nařízení vlády, kterým se stanoví technické požadavky na výrobky z hlediska jejich elektromagnetické kompatibility,
 - č. 170/1997 Sb. Nařízení vlády, kterým se stanoví technické požadavky na strojní zařízení,
 - č. 173/1997 Sb. Nařízení vlády, kterým se stanoví vybrané výrobky k posuzování shody,
 - č. 175/1997 Sb. Nařízení vlády, kterým se stanoví technické požadavky na jednoduché tlakové nádoby,
 - č. 176/1997 Sb. Nařízení vlády, kterým se stanoví technické požadavky na zařízení a ochranné systémy určené pro použití v prostředí s nebezpečím výbuchu,
 - č. 177/1997 Sb. Nařízení vlády, kterým se stanoví technické požadavky na spotřebiče plyných paliv aj.

Nicméně odpovědnost za spolehlivost výrobku plně spočívá na výrobcí, promítá se do jeho nákladů a samozřejmě i do ceny výrobku nebo služby pro zákazníka. Poučený a odpovědný zákazník ovšem posuzuje cenu v širších souvislostech, ne pouze jako jeden jediný a rozhodující znak jakosti. Je ji nutno začlenit do integrálního ukazatele jakosti (podíl efektu užití výrobku a nákladů celého jeho životního cyklu) a teprve podle tohoto ukazatele posuzovat výhodnost výrobku nebo poskytované služby.

Provozní spolehlivost

Inherentní spolehlivost přechází ve spolehlivost provozní instalací (uvedením) výrobku do provozu, jeho zasazením do reálných provozních podmínek, které lze charakterizovat takto:

- pracovní režim je zpravidla variabilnější (proměnlivější) ve srovnání s laboratorním; lze předpokládat neočekávaně zvýšená namáhání, ne vždy kvalifikované zacházení, obsluhu apod.,
- údržbářský režim je rovněž variabilnější ve srovnání s předpisem, ne vždy je dodržován a mnohdy je i měněn, doplňován, redukován apod.,
- k inherentní bezporuchovosti a udržitelnosti je přiřazována celá organizační a strukturální sféra logistické zajištění údržby:
- kvalifikace, školení a výcvik pracovníků v údržbě,
- technické příručky a software (pokyny a manuály pro obsluhu, údržbu diagnostiku, opravy, katalog náhradních dílů apod.),
- zkušební a údržbářské zařízení (komerční a speciální nářadí a přípravky, univerzální měřicí a diagnostické přístroje, zkušební stolice apod.),
- zásobování náhradními díly (plánování, identifikace, řízení zásob, distribuční kanály, síť skladů apod.),
- objekty a jejich vybavení (architektonické a stavební řešení, struktura pracovišť a jejich technologické vybavení, sklady náhradních dílů, klimatizace apod.).

Na první pohled se zdá, že jde především o sféru uživatele výrobku. Není tomu tak, i o tuto provozní etapu životního cyklu výrobku spojenou především se zabezpečováním jeho provozní spolehlivosti se musí starat výrobce. Pečlivě musí monitorovat skutečné pracovní režimy svých výrobků a pokud vyrábí opravitelné a opravované výrobky, musí pro ně připravit plán údržby a jejího zajištění.

V této souvislosti je nutné konstatovat, že v některých podnicích inženýr pro udržitelnost a zajištění údržby, ať již s plnou nebo částečnou pracovní náplní. Předepisované programy údržby bývají náročnější ve srovnání s reálnými potřebami a požadavky strojů a zařízení (návrhář se jistí čtenější a náročnější údržbou) na straně jedné a na straně druhé dochází k opomenutí a neřešení požadavků na udržitelnost resp. není plánován a požadován údržbářský zásah tam, kde je nezbytný pro zabránění výskytu havarijní nebo kritické poruchy. Velmi je opomíjeno používání metodologie údržby zaměřené na bezporuchovost.

Při projektování složitějšího výrobního zařízení (zejména ve vazbě na bezpečnost provozu), jsou-li vyčerpány možnosti základních prvků zařízení, je třeba využívat pro zvýšení jeho spolehlivosti

zálohování. V praxi chybí výpočty optimálního stupně zálohování, ať již z nedostatku vstupních údajů nebo z neznalosti metodických postupů.



Shrnutí pojmů

Projektovaná spolehlivost, provozní spolehlivost, inherentní spolehlivost, životní cyklus objektu z hlediska spolehlivosti.



Otázky

1. Charakterizujte pojmy projektovaná spolehlivost, inherentní spolehlivost, provozní spolehlivost.
2. Charakterizujte životní cyklus objektu z hlediska spolehlivosti, a které další aspekty je nutné do tohoto cyklu zahrnout.

1.3. Klasifikace objektů a systémů



Čas ke studiu: 0,5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat dvoustavové a vícestavové systémy, opravitelný a neopravitelný výrobek (objekt),
- popsat pojem obnova.



Výklad

Důležitou složkou při řešení problematiky spolehlivosti jsou orientační, zpřesněné a kontrolní výpočty spolehlivosti, kterými zjišťujeme spolehlivostní vlastnosti systémů ve formě číselných ukazatelů spolehlivosti.

Podklady pro výpočty jsou připravovány technicko-ekonomickými rozbory, jejichž účelem je specifikovat ty vlastnosti navrhovaného systému, které jsou významné pro výpočet spolehlivosti, zvolit efektivní výpočtové metody a připravit vstupní data pro výpočet. Rozbory se zabývají zejména těmito problémy:

- strukturou systému a specifikací jeho provozních stavů,
- předpokládaným rozdělením pravděpodobnosti ukazatelů spolehlivosti,
- volbou efektivní techniky výpočtů a výpočtových metod,
- vypracováním spolehlivostního modelu systému,
- výpočtovými metodami a jejich omezeními.

Racionální přístup k těmto problémům do značné míry určuje přesnost a efektivnost výpočtu. Náplň jednotlivých témat rozborů proto v dalším textu stručně rozebereme.

Na objekt, jehož spolehlivostí se zabýváme, je nutno nahlížet jako na systém, který v souladu s teorií systémů se hierarchicky může členit na dílčí subsystémy a na nejnižší úrovni pak na prvky systému. Všechny tyto části mají své vlastní charakteristiky spolehlivosti, které se mezi sebou liší a liší se i od charakteristik systému jako celku. K této skutečnosti je nutno přihlížet i při třídění a dalším využití informací o poruchách.

Pomocí rozboru kritérií poruch lze vytvářet poruchové modely. Zde vycházíme ze stavu objektu. Přinejmenším rozlišujeme dva stavy, kdy objekt je buď ve stavu provozuschopném nebo ve stavu poruchovém a přechod z jednoho stavu do druhého se děje skokem. Hovoříme pak o dvoustavovém modelu a je to nejběžnější a nejčastější klasifikace stavu objektu.

- **Dvoustavové systémy** charakterizuje to, že z hlediska spolehlivosti může být systém pouze ve dvou stavech. Buď je ve stavu bezporuchového provozu nebo je ve stavu poruchového prostoje. Dále předpokládáme, že přechody z jednoho stavu do druhého probíhají skokem.

Pro přesnější analýzu lze však definovat různé mezistavy mezi těmito krajními póly. Objekt může být ve stavu částečné poruchy, může např. plnit všechny své funkce, ale ne na plný výkon nebo neplní své funkce s ohledem na efektivnost, ekologičnost, ergonomičnost, atd. Pak hovoříme o vícestavových modelech.

- **Vícestavové systémy** se vyznačují přechody mezi stavy s různými úrovněmi funkční způsobilosti a s menší efektivností nebo s menší pravděpodobností že požadovaná cílová funkce, pro kterou je systém určen bude splněna.

Pozn. Rozbory ukazatelů spolehlivosti vícestavových systémů omezíme na případy, kdy se přechody mezi jednotlivými stavy systémů, vyvolané poruchami, dějí skokem, kdy střední doba mezi poruchami je řádově delší než střední doba obnovy a kdy systém pracuje se stejnou efektivností do okamžiku poruchy. Tyto podmínky splňuje velká většina dnešních systémů.

Z hlediska dalšího vývoje provozní situace po poruše je pro spolehlivost důležité, zda se objekt vrací do stavu provozuschopného či nikoliv. Podle toho se rozlišují:

- **výrobky neopravitelné**, což jsou výrobky s jednorázovým použitím, které v případě poruchy dále neopravujeme.

Spolehlivost se zde hodnotí z hlediska bezporuchovosti, životnosti, bezpečnosti a skladovatelnosti.

Jsou to např. žárovky, tranzistory, ložiska, ozubená kola atd.. Oprava výrobku není prováděná z důvodů vlastní funkce výrobku, protože jejich oprava není ekonomicky výhodná. Za neopravitelné výrobky lze považovat i takové, které ve skutečnosti opravujeme po určitém časovém odstupu. Oprava se neprovádí bezprostředně při funkci zařízení. Uvedené výrobky z hlediska spolehlivosti sledujeme v režimech, ve kterých se mohou nacházet, tj. v provozu nebo v prostoji (vlastní prostoj, skladování, konzervace, doprava). Často se jedná o prvky systémů na nejnižší hierarchické úrovni.

- **výrobky opravitelné**, které se v případě poruchy nevyřazují, ale opravují a dále se používají. V průběhu používání tyto výrobky mohou mít celou řadu poruch. Pro tyto výrobky v první části používání, tj. do vzniku první poruchy, budou v platnosti všechny vztahy pro výrobky neopravitelné. Pro posouzení spolehlivosti v dalším období je nutné zavést nové spolehlivostní ukazatele. Zpravidla mají tyto opravitelné výrobky charakter systémů.

Hodnocení spolehlivosti vychází z rozboru bezporuchovosti, udržitelnosti, opravitelnosti, pohotovosti, životnosti, bezpečnosti a skladovatelnosti.

Obnovou objektu se rozumí obnova jeho funkčních vlastností, které po poruše ztratil. Zpravidla se tak děje tím, že se jeho vadné podsystémy a prvky nahradí novými a obnoví se funkční vazby mezi nimi. Z tohoto hlediska jsou složité systémy spíše obnovitelné než jednoduché dílčí systémy a prvky.



Shrnutí pojmů

Systémy dvoustavové a vícestavové, objekt opravitelný a neopravitelný. Pojem obnova.



Otázky

1. Charakterizujte dvoustavové a vícestavové systémy.
2. Vysvětlete rozdíly mezi opravitelnými a neopravitelnými objekty.
3. Definujte pojem obnova.

2 KLASIFIKACE PORUCH



Čas ke studiu: 1 hodinu



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat jednotlivé druhy poruch dle různých hledisek a v jednotlivých obdobích technického života objektu, popsat průběh poruchy postupné, náhlé a občasně.



Výklad

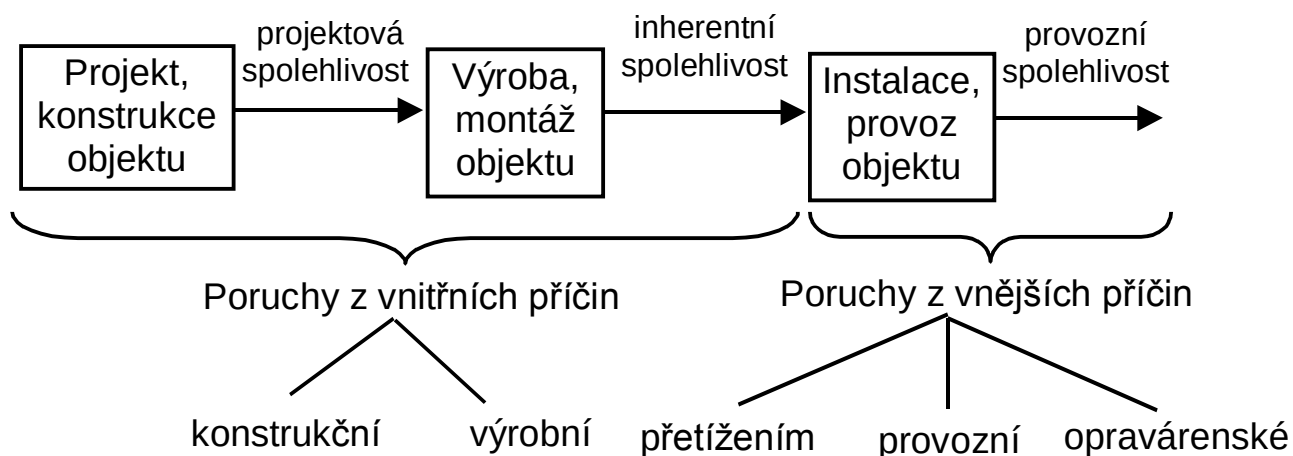
Při řešení problematiky spolehlivosti je třeba rozlišovat provozuschopný stav objektu, tj. takový technický stav, kdy objekt je schopen plnit stanovené funkce a dodržovat parametry provozu stanovené technickou dokumentací a poruchový stav. Poruchou zde rozumíme jev, který způsobuje ztrátu schopnosti plnit požadované funkce. Procesy vedoucí ke vzniku poruch se nazývají mechanismus poruch. Vyjadřují se souhrnem znaků, které charakterizují přechod z provozuschopného stavu do poruchového stavu. Někdy tento souhrn znaků označujeme jako kritéria poruchy.

Poruchy se klasifikují podle různých hledisek. Pro naše účely se přidržíme členění dle [1]:

- Podle příčin vzniku poruchy:

- poruchy z vnějších příčin (přetížení, provozní ...),
- poruchy z vnitřních příčin (konstrukční, výrobní ...).

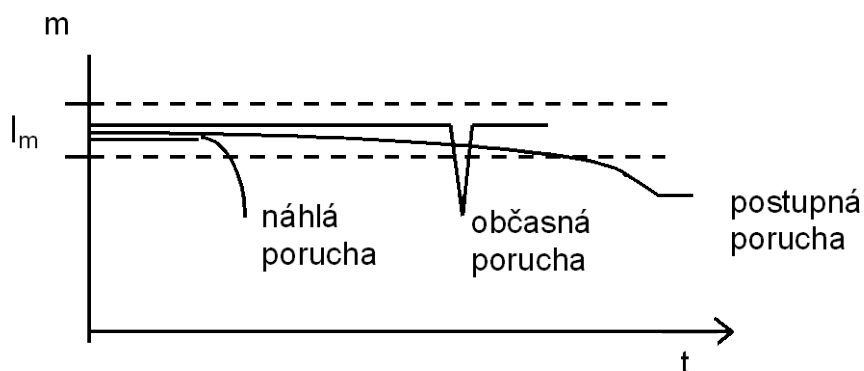
Zdrojem poruch z vnitřních příčin je zpravidla projekt a konstrukce objektu, výroba a montáž, méně pak instalace a provoz objektu. Poslední dvě jmenované oblasti jsou zdrojem poruch z vnějších příčin.



Obr. 3 Klasifikace poruch podle příčin vzniku

- Podle časového průběhu změn parametrů:

- poruchy náhlé (skoková změna),
- poruchy postupné (opotřebení, stárnutí),
- poruchy občasné (např. selhání po krátkou dobu).



Obr. 4 Třídění poruch podle časového průběhu změny parametru m s povolenou tolerancí I_m

- Podle stupně porušení provozuschopnosti:

- poruchy úplné,
- poruchy částečné.

Kombinací výše uvedeného členění lze dále rozlišovat:

- poruchy havarijní (náhlé a úplné),
- poruchy degradační (postupné a částečné).

- Podle následků poruch:

- poruchy kritické (ohrožení zdraví, života, životního prostředí),
- poruchy podstatné (ztráta provozuschopnosti),
- poruchy nepodstatné (nevedou ke ztrátě provozuschopnosti).



Příloha 1 - Klasifikace poruch

1. Podle podmínek vzniku
 - 1.1. Při splnění předepsaných provozních podmínek - porucha z vnitřních příčin
 - 1.2. Při nesplnění předepsaných provozních podmínek - porucha z vnějších příčin
2. Podle vztahu k jiným poruchám
 - 2.1. Nezávislá porucha
 - 2.2. Závislá porucha
3. Podle původu poruchy
 - 3.1. Konstrukční porucha
 - 3.2. Systematická porucha
 - 3.3. Výrobní porucha
 - 3.4. Provozní porucha
 - 3.5. Porucha dožitím
 - 3.6. Opravárenská porucha
4. Podle rozsahu

- 4.1. Úplná porucha
- 4.2. Částečná porucha
- 4.3. Havarijní porucha
- 4.4. Degradací porucha
5. *Podle průběhu změn parametru*
 - 5.1. Náhlá porucha
 - 5.2. Postupná porucha
 - 5.3. Občasná porucha
6. *Podle výskytu v čase*
 - 6.1. Časná porucha - období časných poruch
 - 6.2. Náhodná porucha - období normálního provozu
 - 6.3. Porucha dožitím - období poruch dožitím
 - 6.4. Systematická porucha
7. *Podle projevu poruchy*
 - 7.1. Úplná ztráta funkce - úplná porucha
 - 7.2. Změna (zhoršení) parametrů - částečná porucha
8. *Podle důsledků poruchy*
 - 8.1. Podle ekonomických důsledků
 - 8.1.1. Závada
 - 8.1.2. Lehká porucha
 - 8.1.3. Těžká porucha
 - 8.2. Podle společenských důsledků
 - 8.2.1. Nezávažná porucha
 - 8.2.2. Závažná porucha
 - 8.2.3. Velmi závažná porucha (kritická) porucha
9. *Podle příčiny poruchy*
10. *Podle mechanismů poruchy*



Shrnutí pojmů

Postupná porucha, náhlá porucha, občasná porucha.

Porucha úplná, částečná, havarijní, degradační, kritické, podstatné a nepodstatné.



Otázky

1. Charakterizujte postupnou, náhlou a občasnou poruchu.
2. Vymenujte další kritéria klasifikace poruch.
3. Definujte dle havarijní a degradační poruchy

3 PRAVDĚPODOBNOSTNÍ A STATISTICKÉ UKAZATELE SPOLEHLIVOSTI

3.1. Pojmy teorie pravděpodobnosti a statistiky



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat pravděpodobnost, relativní četnost,
- popsat distribuční funkci, hustotu pravděpodobnosti, střední hodnotu, kvantil,
- stanovovat základní pravděpodobnostní a statistické veličiny.



Výklad

Ukazatele spolehlivosti jako kvantitativní vyjádření vlastností určující spolehlivost mají náhodný charakter. Z toho plynou pravidla pro jejich určování a využívání, kterými je matematický aparát teorie pravděpodobnosti a statistiky. Jejich výklad provedme v souladu s [2].

Užijme statistické definice pravděpodobnosti jevu A , že relativní četnost P definovaná vztahem

$$P(A) = \frac{m}{N} \quad (1)$$

kde m je počet pokusů jevu A příznivých,

N celkový počet pokusů,

se zvětšováním se počtu pokusů blíží pravděpodobnosti náhodného jevu $P(A)$.

Vlastnosti náhodných jevů zkoumáme tak, že každému elementárnímu jevu přiřazujeme odpovídající hodnotu x proměnné veličiny X , které říkáme náhodná veličina. Náhodné veličiny mohou být spojité, to jsou takové, které mohou nabývat libovolné hodnoty na daném intervalu, nebo diskrétní, které mohou na daném intervalu nabývat spočetného počtu hodnot. Pravidlo, které každé hodnotě náhodné veličiny přiřazuje pravděpodobnost, že náhodná veličina nabude této hodnoty, je vyjádřeno rozdělením pravděpodobnosti náhodné veličiny.

Rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny X bývá nejčastěji popsáno

- distribuční funkcí $F(x)$

$$F(x) = P(X \leq x) \quad x \in D \quad (2)$$

- hustotou pravděpodobnosti $f(x)$

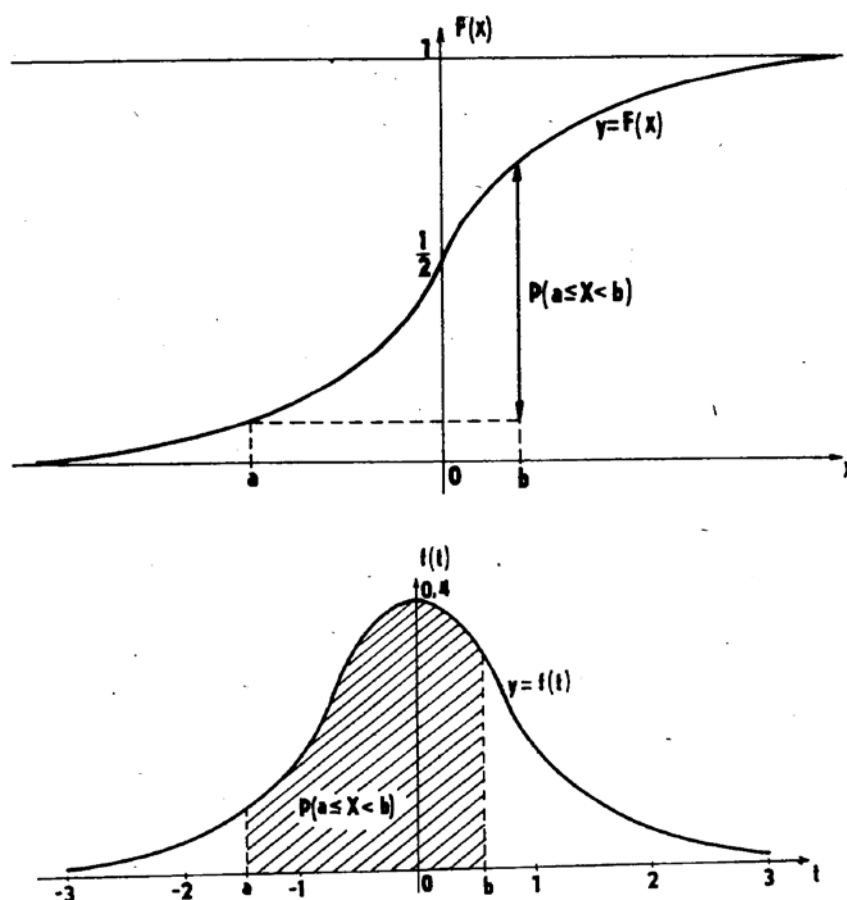
$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad x \in D \quad (3)$$

kde D je definiční obor náhodné veličiny.

Často je výhodné užívat pojmu pravděpodobnostní element, který je definován takto:

$$f(x) \cdot dx = dF(x) \quad (4)$$

Pravděpodobnostní element vyjadřuje pravděpodobnost, že náhodná veličina X leží v nekonečně malém intervalu x a $x + dx$.



Obr. 5 Distribuční funkce a hustota pravděpodobnosti spojitě náhodné veličiny

Při vyšetřování náhodných veličin je někdy užitečné užít kvantilových charakteristik, kterými jsou hodnoty náhodné veličiny v nichž nabývá distribuční funkce předem stanovené hodnoty. Např. p -kvantil je hodnota x_p náhodné veličiny X , jejíž rozdělení pravděpodobnosti je popsáno distribuční funkcí

$$F(x_p) = P(X \leq x_p) = p \quad (5)$$

a jestliže se hodnoty distribuční funkce vyjadřují v procentech, používá se označení $100p$ - procentní kvantil. Padesátiprocentní kvantil se nazývá medián. Někdy se používá α -kritická hodnota veličiny X , která je definována vztahem

$$1 - F(x) = P(X > x_\alpha) = \alpha \quad (6)$$

Distribuční funkce a hustota pravděpodobnosti spojité náhodné veličiny s normálním rozdělením je s vyznačením významu kvantilu uvedena na obr. 5.

S přihlédnutím k výše uvedené definici pravděpodobnosti můžeme rozlišovat [2]:

- průměrné hodnoty náhodné veličiny $M^*[X]$,

- střední hodnoty náhodné veličiny $M[X]$.

Průměrná hodnota $M^*[X]$ náhodné veličiny X je rovna součtu všech jednotlivých hodnot náhodné veličiny dělenému jejich počtem:

$$M^*[X] = \frac{1}{N} \cdot (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_N) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i \quad (7)$$

kde N je celkový počet měření,

x_i jednotlivé hodnoty náhodné veličiny X .

Při zvyšujícím se počtu měření hodnot náhodné veličiny si v praxi počínáme tak, že výsledky rozdělujeme do k třídních intervalů a zaznamenáváme četnosti naměřených hodnot náhodné veličiny X , patřících do příslušného intervalu. Vytváříme tak histogram (obr. 6), který je analogií hustoty pravděpodobnosti pro diskrétní náhodnou veličinu. Pak pro průměrnou hodnotu $M^*[X]$ lze psát:

$$M^*[X] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k P_i \cdot x_i \quad (8)$$

kde x_i je střed i -tého třídního intervalu,

P_i relativní četnost výsledků pro daný interval,

k počet třídních intervalů.

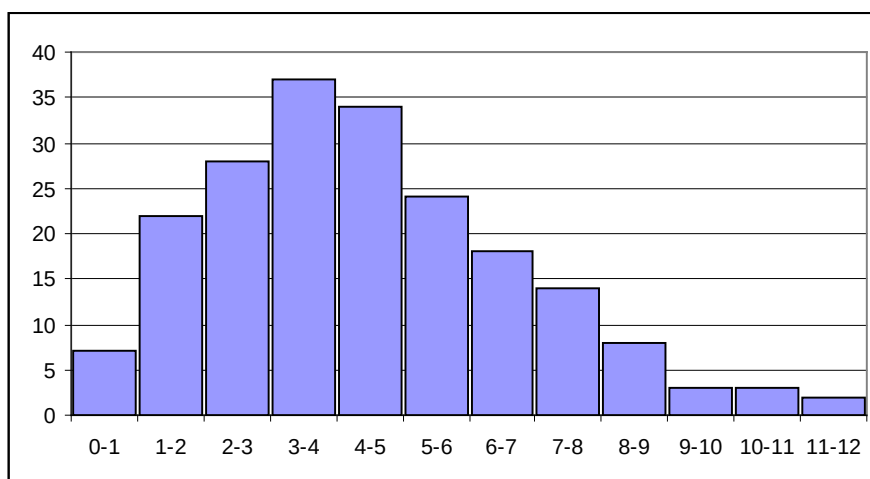
Relativní četnost v třídním intervalu je definována vztahem

$$P_i = \frac{m_i}{N} \quad (9)$$

kde m_i je absolutní četnost naměřených údajů v i -tém intervalu,

N celkový počet měření.

Na obr. 6 je uveden příklad histogramu měřených údajů náhodné veličiny.



Obr. 6 Histogram naměřených údajů

Střední hodnotu $M[X]$ náhodné veličiny definujeme jako hodnotu, která má být podle teoretických úvah výsledkem velkého počtu měření. Pak četnosti P_i ve vztahu (9) přejdou v pravděpodobnosti a pro střední hodnotu diskrétní náhodné veličiny lze psát

$$M[X] = \sum_{j=1}^N P_j \cdot x_j \quad (10)$$

kde x_j jsou hodnoty náhodné veličiny,
 P_j příslušné pravděpodobnosti.

Analogicky pro spojitou náhodnou veličinu přejdeme od sumace k integrálu, a když uvážíme, že pravděpodobnost, že náhodná veličina leží v nekonečně malém intervalu x a $x+dx$, se rovná pravděpodobnostnímu elementu

$$f(x)dx = dF(x)$$

je střední hodnota spojitě náhodné veličiny dána výrazem

$$M[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x)dx \quad (11)$$

Často pracujeme s centrovanou náhodnou veličinou, která je dána odchylkou hodnot této veličiny od její střední hodnoty. Její střední hodnota je nulová. Střední hodnota dvojmoči odchylky od střední hodnoty je rozptyl, označuje se $D[X]$ a pro spojitě náhodné veličiny jej lze zapsat výrazem:

$$D[X] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - M[X])^2 \cdot f(x)dx \quad (12)$$

Kladná odmocnina z rozptylu je směrodatná odchylka σ .

Analogicky můžeme využít výše uvedené úvahy o přechodu od četnosti k pravděpodobnosti při zvyšujícím se počtu měření i při výkladu statistických ukazatelů spolehlivosti. Často se sledují zkoušky nebo použití objektů do úplné poruchy. V tomto případě budou statistické ukazatele s růstem počtu zkoumaných objektů v limitě konvergovat k analogickým pravděpodobnostním ukazatelům, které však přesně vzato jsou matematickou abstrakcí.

Avšak mnohé ukazatele spolehlivosti se definují názorněji v termínech pravděpodobnosti než ve statistických termínech. Je rovněž logičtější provádět apriorní výpočty a rozborů spolehlivosti ve stádiích projektování na základě pravděpodobnosti, než na základě statistiky.



Řešený příklad

Zadání

Bylo zkoušeno deset žárovek a byly zjištěny tyto doby života v hodinách: 800, 222, 630, 628, 700, 672, 730, 506, 585 a 785.. Vypočítejte střední dobu života a směrodatnou odchylku.

Řešení:

a) výpočet střední hodnoty a směrodatné odchylky bez rozdělení do tříd

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{vi} x_i = \frac{1}{10} \cdot (800 + 222 + 630 + 628 + 700 + 672 + 730 + 506 + 585 + 785) = \frac{6258}{10} = 625.8$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n} - \bar{x}^2} = \sqrt{\frac{800^2 + 222^2 + 630^2 + 628^2 + 700^2 + 672^2 + 730^2 + 506^2 + 585^2 + 785^2}{10} - 625.8^2} = \sqrt{416953.8 - 391625.64} = \sqrt{25328.16} = 159.15$$

b) výpočet střední hodnoty a směrodatné odchylky s rozdělením do tříd

Za nový počátek zde byla zvolena hodnota 655, šířka intervalu 100.

Třídní intervaly	Střední intervalů	Četnost f	ρ	$f \cdot \rho$	$f \cdot \rho^2$
205 až 305	255	1	-4	-4	16
305 až 405	355	0	-3	0	0
405 až 505	455	0	-2	0	0
505 až 605	555	2	-1	-2	2
605 až 705	655	4	0	0	0
705 až 805	755	3	1	3	3
805 až 905	855	0	2	0	0
		$\Sigma f = n = 10$	---	$\Sigma f \cdot \rho = -3$	$\Sigma f \cdot \rho^2 = 21$

Střední hodnota

$$\bar{x} = \text{zvolený počátek} + \frac{\sum f \cdot \rho}{n} \cdot \Theta$$

$$\bar{x} = 655 + \frac{-3}{10} \cdot 100 = 655 - 30 = 625$$

Směrodatná odchylka

$$\sigma = \Theta \cdot \sqrt{\frac{\sum (f \cdot \rho^2)}{n} - \left(\frac{\sum (f \cdot \rho)}{n} \right)^2}$$

$$\sigma = 100 \cdot \sqrt{\frac{21}{10} - \left(\frac{-3}{10} \right)^2} = 100 \cdot \sqrt{2.10 - 0.09} = 100 \cdot \sqrt{2.01} = 141.77$$

Stejné zadání, jiný počáteční bod, jiná šířka intervalu.

Za nový počátek zde byla zvolena hodnota 630, šířka intervalu 50.

Třídni intervaly	Střední intervalů	Četnost f	ρ	$f \cdot \rho$	$f \cdot \rho^2$
205 až 255	230	1	-8	-8	64
255 až 305	280	0	-7	0	0
305 až 355	330	0	-6	0	0
355 až 405	380	0	-5	0	0
405 až 455	430	0	-4	0	0
455 až 505	480	0	-3	0	0
505 až 555	530	1	-2	-2	4
555 až 605	580	1	-1	-1	1
605 až 655	630	2	0	0	0
655 až 705	680	2	1	2	2
705 až 755	730	1	2	2	4
755 až 805	780	2	3	6	18
		$\Sigma f = n = 10$	---	$\Sigma f \cdot \rho = -1$	$\Sigma f \cdot \rho^2 = 93$

Střední hodnota

$$\bar{x} = \text{zvolený počátek} + \frac{\sum f \cdot \rho}{n} \cdot \Theta$$

$$\bar{x} = 630 + \frac{-1}{10} \cdot 50 = 630 - 5 = 625$$

Směrodatná odchylka

$$\sigma = \Theta \cdot \sqrt{\frac{\sum (f \cdot \rho^2)}{n} - \left(\frac{\sum (f \cdot \rho)}{n} \right)^2}$$

$$\sigma = 50 \cdot \sqrt{\frac{93}{10} - \left(\frac{-1}{10} \right)^2} = 50 \cdot \sqrt{9.30 - 0.01} = 50 \cdot \sqrt{9.29} = 152.39$$



Shrnutí pojmů

Pravděpodobnost, relativní četnost, distribuční funkce, hustota pravděpodobnosti, střední hodnota, směrodatná odchylka, rozptyl,



Otázky

1. Definujte pojmy pravděpodobnost a relativní četnost a vysvětlete rozdíl mezi nimi.
2. Definujte pojem distribuční funkce.
3. Jakou veličinu označujeme jako náhodnou veličinu.
4. Které jsou základní statistiky vztahující se k problematice spolehlivosti objektu.

4 UKAZATELE SPOLEHLIVOSTI NEOBNOVOVANÝCH OBJEKTŮ

4.1. Statistické určování spolehlivostních ukazatelů bezporuchovosti



Čas ke studiu: 2,5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat pravděpodobnost bezporuchového provozu, pravděpodobnost poruchy, hustotu poruch, intenzitu poruch, střední dobu bezporuchového provozu.(statisticky),
- vyřešit stanovení základních ukazatelů bezporuchovosti statisticky.



Výklad

Pro statistické určení spolehlivostních charakteristik neobnovovaných objektů sledujeme soubor objektů téhož typu za stejných podmínek [1], [4], [5]. Počet prvků souboru označme N . Pro dané kritérium poruchy sledujeme v pravidelných časových jednotkách Δt časový rozpad souboru na $N(t)$ objektů, které do doby t pracovaly bez poruchy a na $B(t)$ objektů, u nichž do doby t nastala porucha. Zřejmě platí:

$$N(t) + B(t) = N \quad (13)$$

Pro bodový odhad $R(t)$ pravděpodobnosti bezporuchového stavu v intervalu $<0, t>$ lze psát

$$R(t) = \frac{N(t)}{N} \quad (14)$$

Stříška nad písmenem R znamená, že se jedná o statistický odhad. Obdobně tomu bude i u dalších odhadovaných ukazatelů, kde základem numerického vyčíslení jsou empiricky získané relativní četnosti náhodných jevů.

Obdobně lze statisticky definovat pravděpodobnost poruchy $F(t)$ v časovém intervalu $<0, t>$.

$$F(t) = \frac{B(t)}{N} = \frac{N - N(t)}{N} \quad (15)$$

Ukazatele $R(t)$ a $F(t)$ jsou bezrozměrné veličiny. Velmi často se k určování charakteristik spolehlivosti užívá hustoty poruch $f(t)$ a intenzity poruch $\lambda(t)$.

Při statistických odhadech ukazatelů $f(t)$ a $\lambda(t)$ je nutno zaznamenávat ještě počet objektů $\Delta B(\Delta T)$, u nichž nastala porucha v krátkém čase ΔT po době t .

$$\Delta B(\Delta T) = B(t + \Delta T) - B(t) \quad (16)$$

Protože přibližně platí

$$\Delta B(\Delta T) = N \cdot f(t) \cdot \Delta T \quad (17)$$

lze pro bodový odhad hustoty pravděpodobnosti poruch v intervalu $<0, t>$ psát

$$f(t) = \frac{\Delta B(\Delta T)}{N \cdot \Delta T} \quad (18)$$

Z uvedeného vztahu plyne, že hustota pravděpodobnosti poruch vyjadřuje relativní počet objektů, u nichž došlo k poruše v krátkém časovém intervalu ΔT po době t .

Pro bodový odhad intenzity poruch lze psát

$$\lambda(t) = \frac{\Delta B(\Delta T)}{N(t) \Delta T} \quad (19)$$

Intenzita poruch vyjadřuje poměr počtu objektů porouchaných v časovém intervalu po době t k počtu objektů, které byly v čase t bez poruchy.

Ukazatele $f(t)$ a $\lambda(t)$ jsou relativní hodnoty s rozměrem $1/t$.

Pro statistické odhady musí být voleno N dostatečně velké, T dostatečně malé, ale takové, aby $\Delta B(\Delta T)$ nebylo příliš malé.

Pro ilustraci použijme příklad dle [3], který doplníme o výpočet některých dalších ukazatelů. Naměřené a vypočtené hodnoty seřadíme do tab.1. Počty objektů $N(t)$ bez poruchy, resp. počty porouchaných objektů $B(t)$ se sledují v pravidelných časových okamžicích

$$t_i = i \cdot \Delta T,$$

kde $i = 0, 1, 2, \dots, m$,

T je pevně zvolený interval pozorování,

m určuje konec pozorování při vzniku úplného rozpadu souboru.

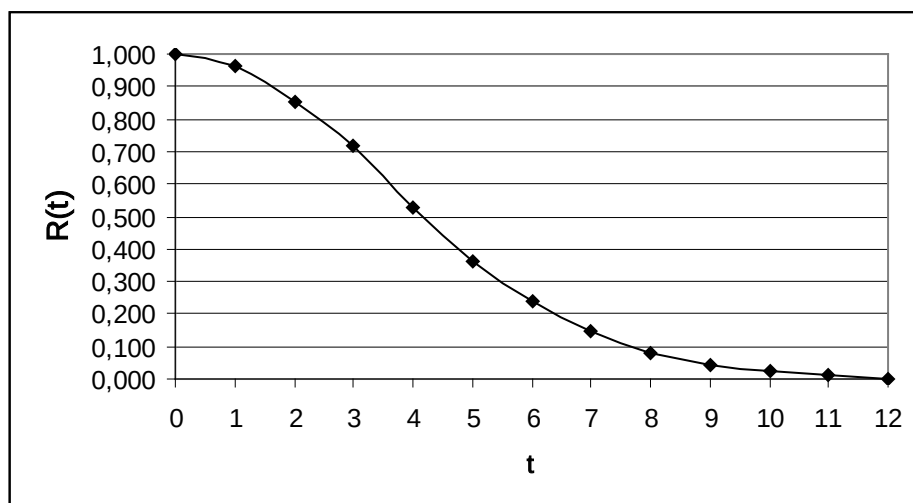
Jestliže z naměřených prvků sestojíme graf, kde je na vodorovné ose čas t a na svislé ose podíl počtu ještě provozuschopných kusů na jejich výchozím počtu, získáme tzv. křivku výpadu $R(t)$ (obr. 6). Jedná se o bodové odhady pravděpodobnosti bezporuchového stavu vyhodnocované dle vztahu (14). Podobně si počínáme při stanovení pravděpodobnosti poruchy $F(t)$. Pro odhad intenzity poruch $\lambda(t)$ a hustoty pravděpodobnosti poruch $f(t)$ je nutno určovat počty $\Delta B(\Delta T)$ objektů porouchaných během jednotlivých intervalů pozorování ΔT dle vztahu

$$\Delta B(i \cdot \Delta T) = B((i+1) \cdot \Delta T) - B(i \cdot \Delta T) \quad (20)$$

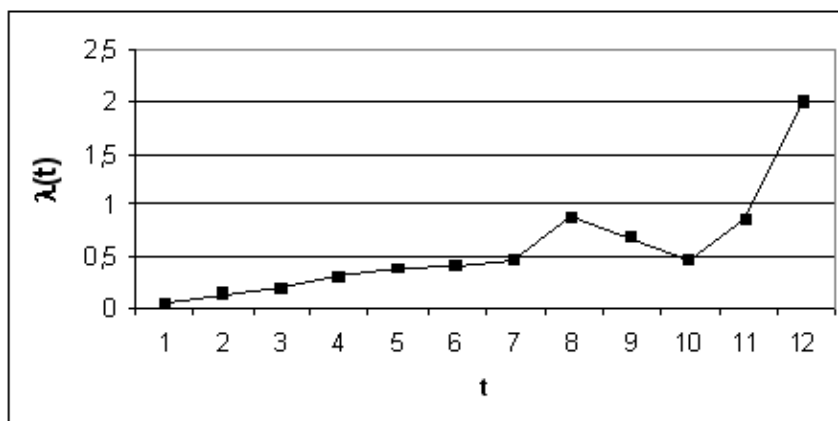
Pak pomocí těchto údajů a využitím vztahů (15), (18), (19), (20), lze doplnit tabulku 1 ve všech jejích sloupcích. Na obr.7 je vynesena průběh intenzity poruch $\lambda(t)$. Při jeho výpočtu je užita průměrná hodnota $N(t)$ v intervalech ΔT .

Tab.1.: Záznam naměřených a vypočítaných hodnot

t	$N(t)$	$B(t)$	$\Delta B(\Delta T)$	$R(t)$	$F(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
0	200	0		1,000	0,000		
1	193	7	7	0,965	0,035	0,035	0,036
2	171	29	22	0,855	0,145	0,110	0,121
3	143	57	28	0,715	0,285	0,140	0,178
4	106	94	37	0,530	0,470	0,185	0,297
5	72	128	34	0,360	0,640	0,170	0,382
6	48	152	24	0,240	0,760	0,120	0,400
7	30	170	18	0,150	0,850	0,090	0,462
8	16	184	14	0,080	0,920	0,070	0,875
9	8	192	8	0,040	0,960	0,040	0,667
10	5	195	3	0,025	0,975	0,015	0,462
11	2	198	3	0,010	0,990	0,015	0,857
12	0	200	2	0,000	1,000	0,010	2,000



Obr. 7 Křivka výpadu



Obr. 8 Průběh intenzity poruch

Statisticky lze rovněž zjišťovat číselné charakteristiky náhodné veličiny. Tak pro bodový odhad střední doby bezporuchového stavu T_S přibližně platí

$$\bar{T}_S = \int_0^{\infty} R(t)dt \cong \sum_{i=1}^m \bar{R}(i\Delta T) \cdot \Delta T \cong \frac{\Delta T}{N} \cdot \sum_{i=1}^m N(i\Delta T) \quad (21)$$



Řešený příklad

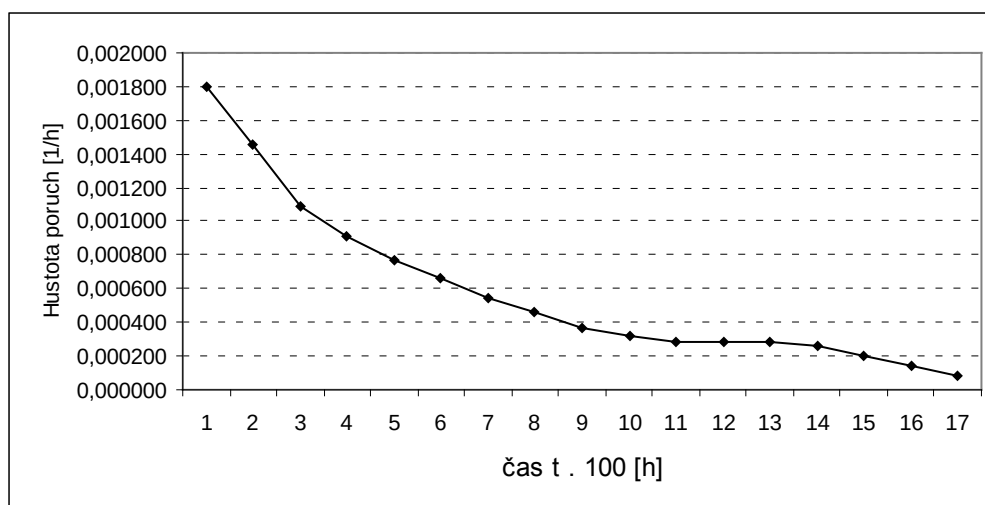
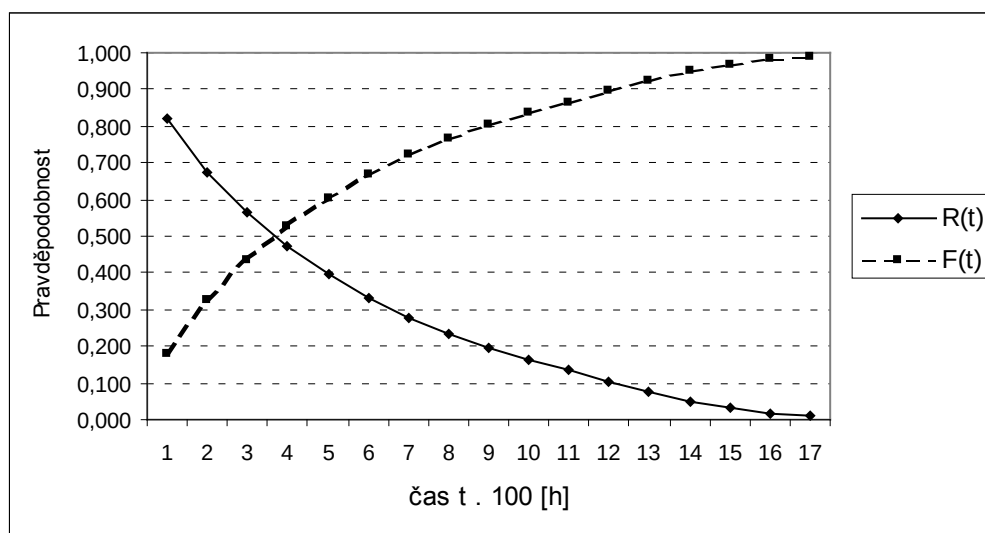
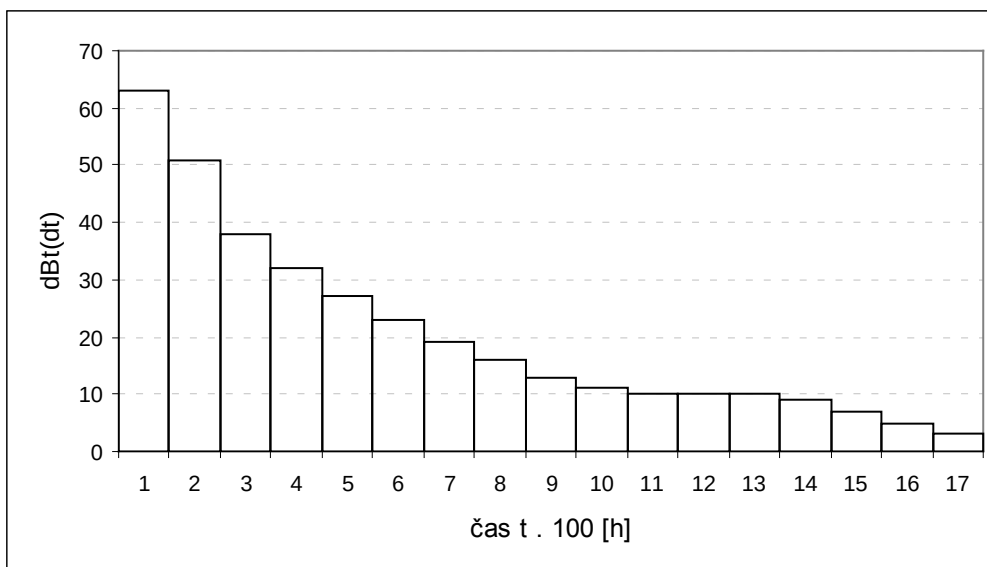
Zadání

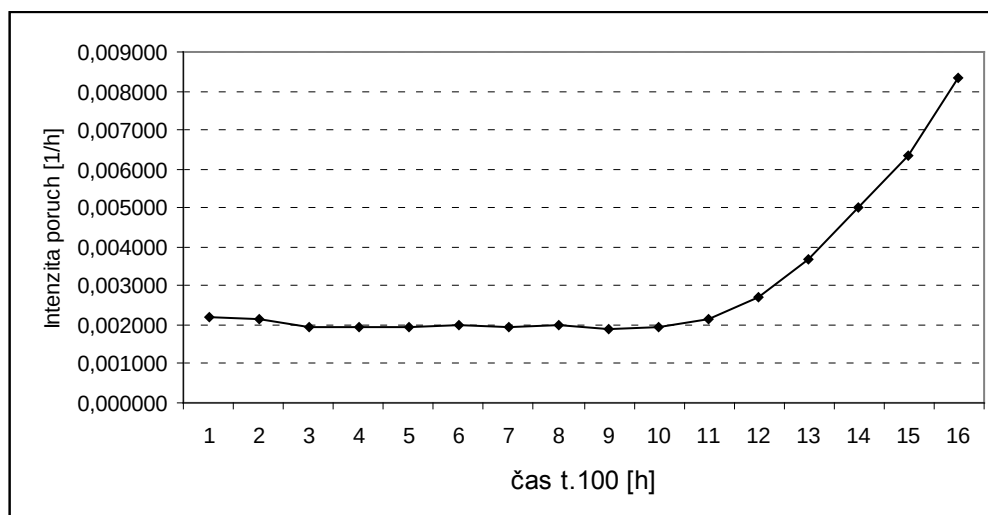
Při spolehlivostní zkoušce $N = 350$ výrobků byly zjištěny počty poruch na konci časových intervalů v jednotlivých intervalech délky $\Delta t = 100$ hodin. Hodnoty jsou uvedeny ve třetím sloupci následující tabulky. Určete empirické funkce základních ukazatelů spolehlivosti a znázorněte graficky jejich časové průběhy.

Řešení:

Postupným použitím výše uvedených vztahů (15), (18), (19) dostáváme

i	t	$\Delta B(\Delta t)$	$N(t)$	$R(t)$	$F(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
1	0 - 100	63	287	0,820	0,180	0,001800	0,002195
2	100 - 200	51	236	0,674	0,326	0,001457	0,002161
3	200 - 300	38	198	0,566	0,434	0,001086	0,001919
4	300 - 400	32	166	0,474	0,526	0,000914	0,001928
5	400 - 500	27	139	0,397	0,603	0,000771	0,001942
6	500 - 600	23	116	0,331	0,669	0,000657	0,001983
7	600 - 700	19	97	0,277	0,723	0,000543	0,001959
8	700 - 800	16	81	0,231	0,769	0,000457	0,001975
9	800 - 900	13	68	0,194	0,806	0,000371	0,001912
10	900 - 1000	11	57	0,163	0,837	0,000314	0,001930
11	1000 - 1100	10	47	0,134	0,866	0,000286	0,002128
12	1100 - 1200	10	37	0,106	0,894	0,000286	0,002703
13	1200 - 1300	10	27	0,077	0,923	0,000286	0,003704
14	1300 - 1400	9	18	0,051	0,949	0,000257	0,005000
15	1400 - 1500	7	11	0,031	0,969	0,000200	0,006364
16	1500 - 1600	5	6	0,017	0,983	0,000143	0,008333
17	1600 - 1700	3	3	0,009	0,991	0,000086	0,010000
18	1700 - 1800	2	1	0,003	0,997	0,000057	0,020000
19	1800 - 1900	1	0	0,000	1,000	0,000029	





Řešený příklad

Zadání

Při spolehlivostní zkoušce $N = 35$ objektů byl na konci časových intervalů délky $\Delta T = 10$ hodin zjišťován počet porouchaných objektů za dobu ΔT - viz. následující tabulka.

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta B(\Delta T)$	0	3	3	5	8	7	6	2	1

Určete empirickou funkci rozdělení doby do poruchy v podobě bodových odhadů $R(i \cdot \Delta T)$ a $\lambda(i \cdot \Delta T)$ pro $i = 1, 2, \dots, 9$ a hodnotu T_s . Vyneste časové průběhy $R(i \cdot \Delta T)$ a $\lambda(i \cdot \Delta T)$.

Řešení

i	T	$\Delta B(\Delta t)$	$N(t)$	$R(t)$	$F(t)$	$\lambda(t)$
1	0 – 10	0	35	1,000	0,000	0,000000
2	10 – 20	3	32	0,914	0,086	0,009375
3	20 – 30	3	29	0,828	0,172	0,010345
4	30 – 40	5	24	0,686	0,314	0,020833
5	40 – 50	8	16	0,457	0,543	0,050000
6	50 – 60	7	9	0,257	0,743	0,077777
7	60 – 70	6	3	0,086	0,914	0,200000
8	70 – 80	2	1	0,029	0,971	0,200000
9	80 – 90	1	0	0,000	1,000	

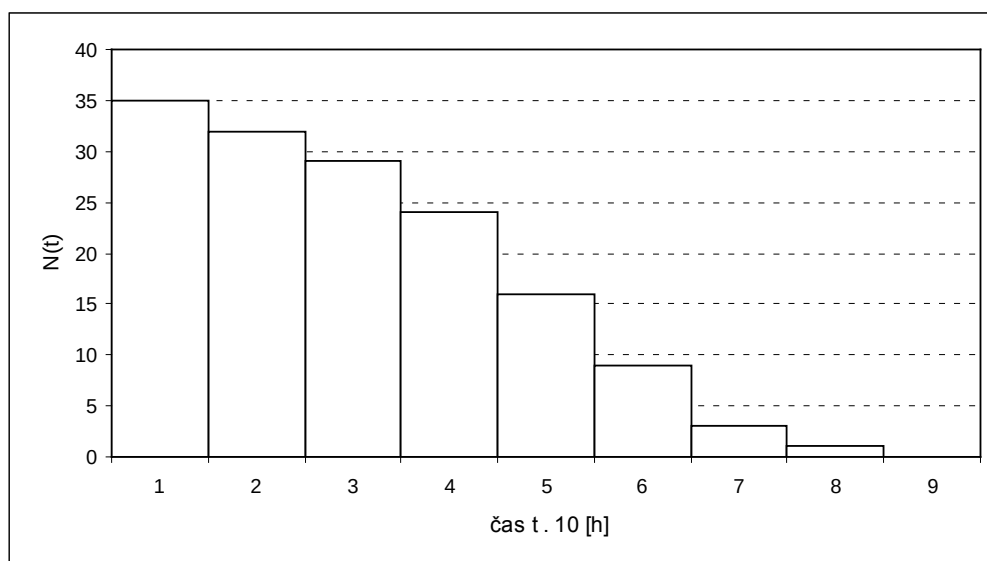
Střední doba bezporuchovosti

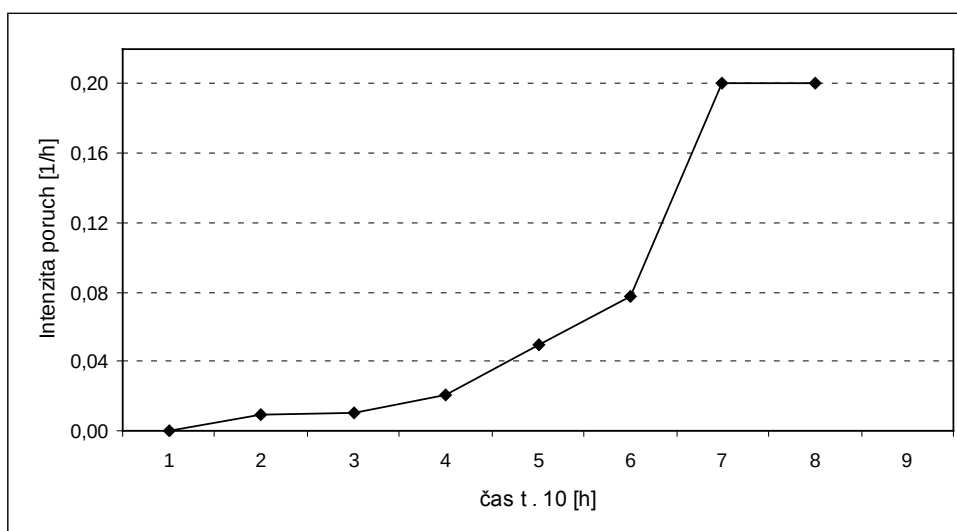
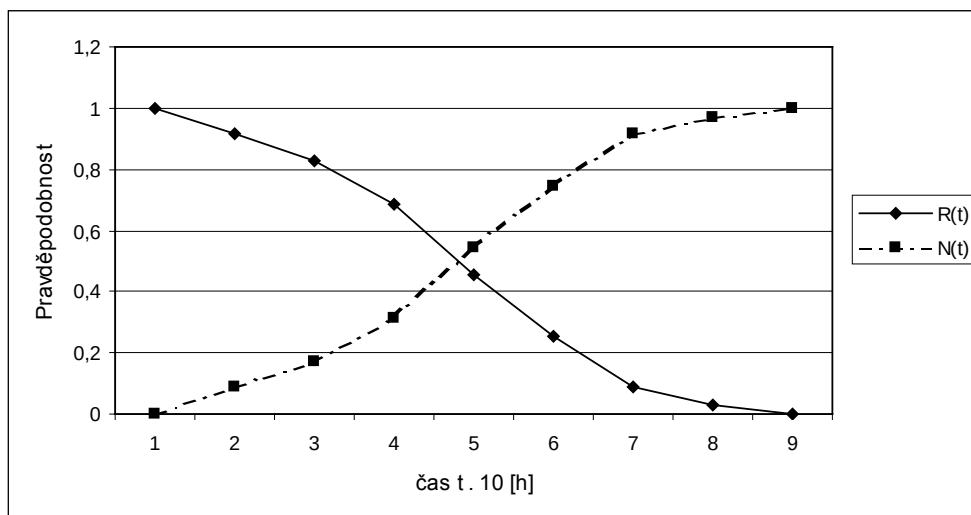
Za nový počátek byla zvolena hodnota 45, šířka intervalu 10.

Třídni intervaly	Střed intervalů	Četnost f	ρ	$f \cdot \rho$	$f \cdot \rho^2$
5 - 15	10	0	-4	0	0
15 - 25	20	3	-3	-9	27
25 - 35	30	3	-2	-6	12
35 - 45	40	5	-1	-5	5
45 - 55	50	8	0	0	0
55 - 65	60	7	1	7	7
65 - 75	70	6	2	12	24
75 - 85	80	2	3	6	18
85 - 95	90	1	4	5	16
		$\Sigma f = n = 35$	---	$\Sigma f \cdot \rho = 10$	$\Sigma f \cdot \rho^2 = 109$

$$\bar{x} = \text{zvolený počátek} + \frac{\sum f \cdot \rho}{n} \cdot \Theta$$

$$\bar{T}_S = 45 + \frac{10}{35} \cdot 10 = 45 + 2.857 = 47.857 \text{ h}$$





Řešený příklad

Zadání

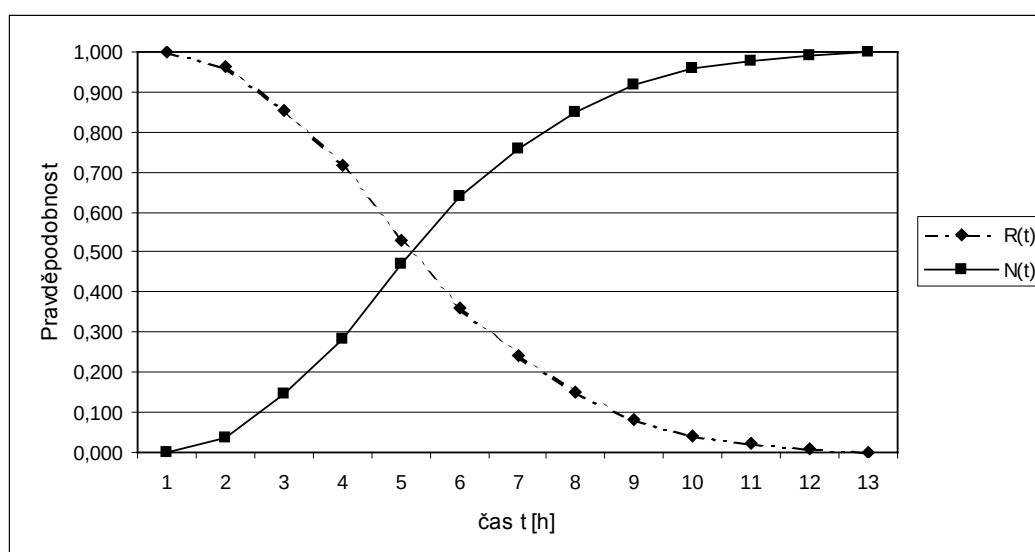
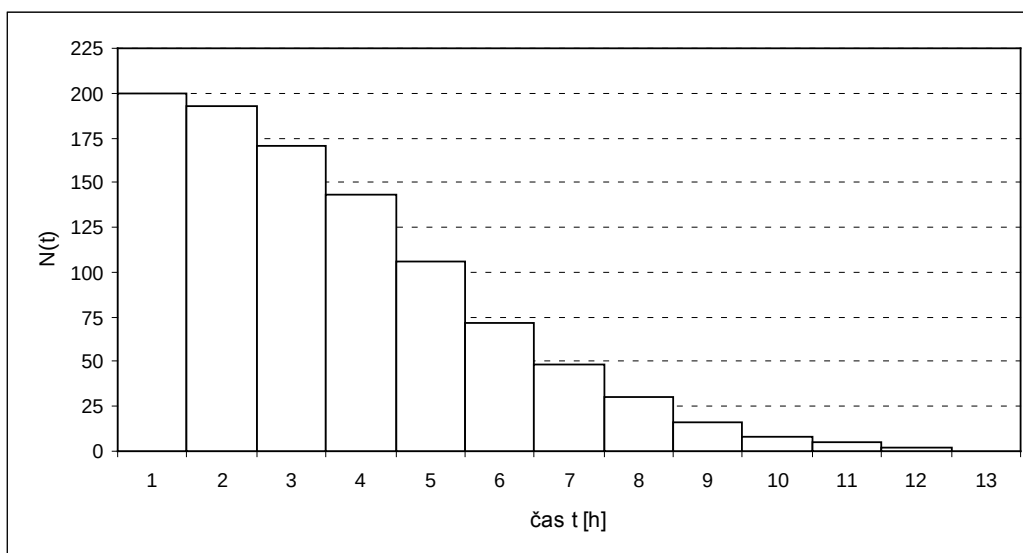
Při spolehlivostní zkoušce $N = 200$ objektů byl na konci časových intervalů délky $\Delta T = 1$ hodina zjišťován počet provozuschopných objektů - viz. následující tabulka.

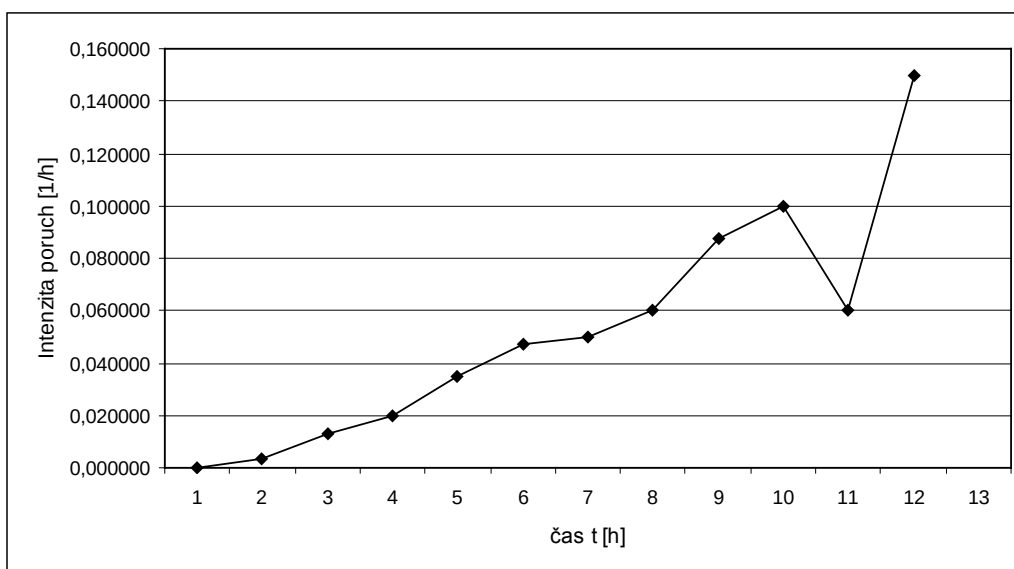
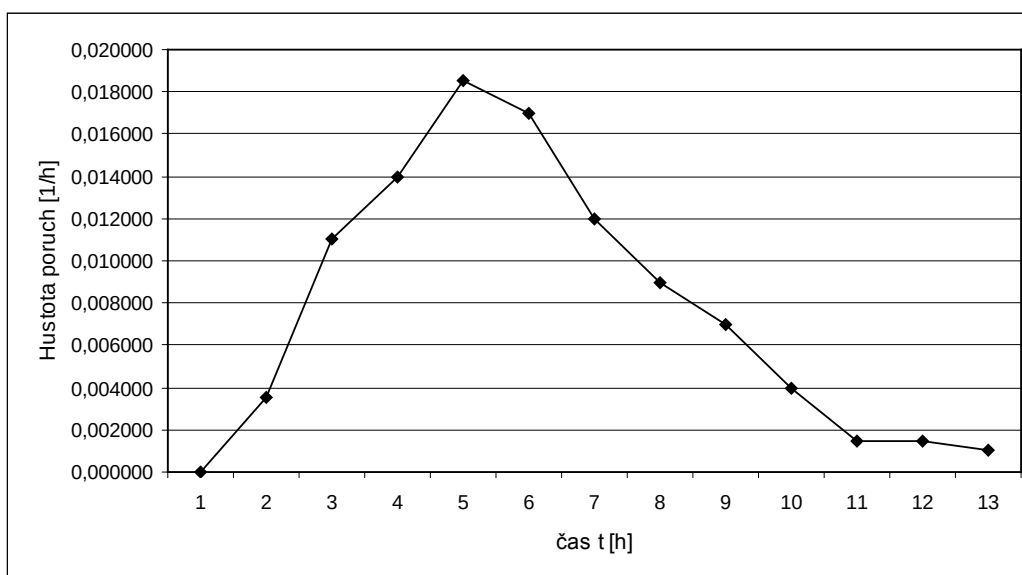
T	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N(t)	200	193	171	143	106	72	48	30	16	8	5	2	0

Určete empiricky průběhy základních funkcí bezporuchovosti v podobě bodových odhadů $F(i \cdot \Delta T)$, $R(i \cdot \Delta T)$, $f(i \cdot \Delta T)$ a $\lambda(i \cdot \Delta T)$ pro $i = 1, 2, \dots, 9$. Vyneste graficky jejich časové průběhy.

Řešení:

i	t	N(t)	$\Delta B(\Delta t)$	R(t)	F(t)	f(t)	$\lambda(t)$
0	0	200	0	1,000	0,000	0,0000	0,0000
1	1	193	7	0,965	0,035	0,0035	0,1210
2	2	171	22	0,855	0,145	0,1100	0,1780
3	3	143	28	0,715	0,285	0,1400	0,2970
4	4	106	37	0,530	0,470	0,1850	0,3820
5	5	72	34	0,360	0,640	0,1700	0,4000
6	6	48	24	0,240	0,760	0,1200	0,4620
7	7	30	18	0,150	0,850	0,0900	0,8750
8	8	16	14	0,080	0,920	0,0700	0,6670
9	9	8	8	0,040	0,960	0,0400	0,4620
10	10	5	3	0,025	0,975	0,0150	0,8570
11	11	2	3	0,010	0,990	0,0150	2,000
12	12	0	2	0,000	1,000	0,0100	





Shrnutí pojmů

Pravděpodobnost bezporuchového provozu, pravděpodobnost poruchy, hustotu poruch, intenzitu poruch, střední dobu bezporuchového provozu.(statisticky).



Otázky

1. Charakterizujte základní ukazatele bezporuchovosti a jejich matematické vyjádření.
2. Charakterizujte veličiny N , $N(t)$, $B(t)$, $\Delta B(\Delta T)$.

4.2. Pravděpodobnostní definice ukazatelů bezporuchovosti



Čas ke studiu: 1 hodinu



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat. pravděpodobnost bezporuchového provozu, pravděpodobnost poruchy, hustotu poruch, intenzitu poruch, střední dobu bezporuchového provozu, zaručená doba bezporuchového provozu.(pravděpodobnosti),
- popsat vztah mezi základními ukazateli bezporuchovosti.,
- vyřešit základní úlohy stanovení ukazatelů bezporuchovosti.



Výklad

Pravděpodobnostní model vychází z popisu náhodné veličiny "doba do poruchy" [1], [3], [5]. Definičním oborem této náhodné veličiny je $\langle 0, \infty \rangle$, nebo $\langle 0, T \rangle$, kde T je doba technického života objektu.

Pravděpodobnost poruchy v intervalu $\langle 0, T \rangle$ je pak definována distribuční funkcí

$$F(t) = P(\zeta \leq t) \quad (22)$$

a vyjadřuje pravděpodobnost, že porucha objektu vznikne v časovém intervalu $\langle 0, t \rangle$.

Pravděpodobnost bezporuchového stavu v intervalu $\langle 0, t \rangle$ je definována

$$R(t) = P(\zeta > t) = 1 - F(t) \quad (23)$$

Podobně lze pro rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny užít hustotu pravděpodobnosti. Pak hustota pravděpodobnosti poruch v intervalu $\langle 0, t \rangle$ je vyjádřena

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (24)$$

Analogicky k předešlému výkladu lze intenzitu poruch $\lambda(t)$ v intervalu $\langle 0, t \rangle$ vyjádřit vztahem

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (25)$$

Tyto ukazatele spolehlivosti $F(t)$, $R(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ jsou rovnocenným vyjádřením rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny ζ . Proto mezi nimi platí převodní vztahy:

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = 1 - \int_0^t f(t) dt = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (26)$$

$$F(t) = 1 - R(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (27)$$

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (28)$$

$$\lambda(t) = \frac{-\frac{dR(t)}{dt}}{R(t)} = \frac{\frac{dF(t)}{dt}}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{1 - \int_0^t f(t) dt} \quad (29)$$

Ke kvantitativnímu hodnocení ukazatelů spolehlivosti se užívají i číselné charakteristiky náhodné veličiny:

- střední doba bezporuchového stavu T_S je vyjadřována dvojím způsobem

$$T_S = M[\xi] = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (30)$$

nebo

$$T_S = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (31)$$

- zaručená doba bezporuchového provozu T určována jako α -kritická hodnota náhodné veličiny, pro kterou platí

$$1 - F(T\alpha) = R(T\alpha) = \alpha$$



Shrnutí pojmů

Pravděpodobnost bezporuchového provozu, pravděpodobnost poruchy, hustotu poruch, intenzitu poruch, střední dobu bezporuchového provozu, zaručená doba bezporuchového provozu (pravděpodobnostní vyjádření).

Popsat vztah mezi základními ukazateli bezporuchovosti.



Otázky

1. Charakterizujte pravděpodobnostním vyjádřením základní ukazatele bezporuchovosti.
2. Který z ukazatelů bezporuchovosti má význam distribuční funkce.

4.3. Rozdělení pravděpodobnosti ukazatelů spolehlivosti systémů



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat vanovou křivku, ukazatele bezporuchovosti při exponenciální pravděpodobnosti poruch,
- popsat .exponenciální a Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti a oblast jeho užití v teorii spolehlivosti,
- stanovit parametry Weibullova rozdělení pravděpodobnosti.



Výklad

Rozdělení ukazatelů bezporuchovosti součástek, výrobků a systémů nebývají stejná. Působí zde rozdílnost výrobních technik a technologií, doba a způsob provozu a další vlivy. Skutečnosti se nejvíce blíží modelování těchto ukazatelů pomocí Weibullova rozdělení a mezního případu tohoto rozdělení - exponenciálního rozdělení.

Exponenciální rozdělení ukazatelů poruchovosti platí s dobrým přiblížením pro provozní dobu, v níž ještě nenastalo mechanické nebo elektrické opotřebování součástek a kdy doba časných poruch je již ukončena. Exponenciální rozdělením se řídí poruchovost systémů s dobře plánovanou a důsledně prováděnou údržbou a poruchovost složitých systémů, které se skládají z velkého počtu součástek s různým rozdělením pravděpodobnosti poruchy. Příznivě působí, že u většiny výrobků a systémů bývá plánován dostatečně dlouhý zkušební provoz, který překrývá údobí časných poruch.

Rozdělení pravděpodobnosti obnovy je dáno složitostí a různorodostí údržby a obnovy funkce. Působí zde společně udržitelnost různých částí systému, organizace zásobování náhradními díly a osobní vlastnosti pracovníků, kteří zabezpečují údržbu a obnovu funkce po poruchách. Pokud člověk nepracuje v mezních podmínkách, lze jeho činnost aproximovat z hlediska spolehlivosti normálním rozdělením. Za vhodnou aproximaci rozdělení pravděpodobnosti ukazatelů bezporuchovosti a opravitelnosti kombinace fyzického zařízení a podsystému člověk-stroj se pokládá normální rozdělení nebo exponenciální rozdělení.

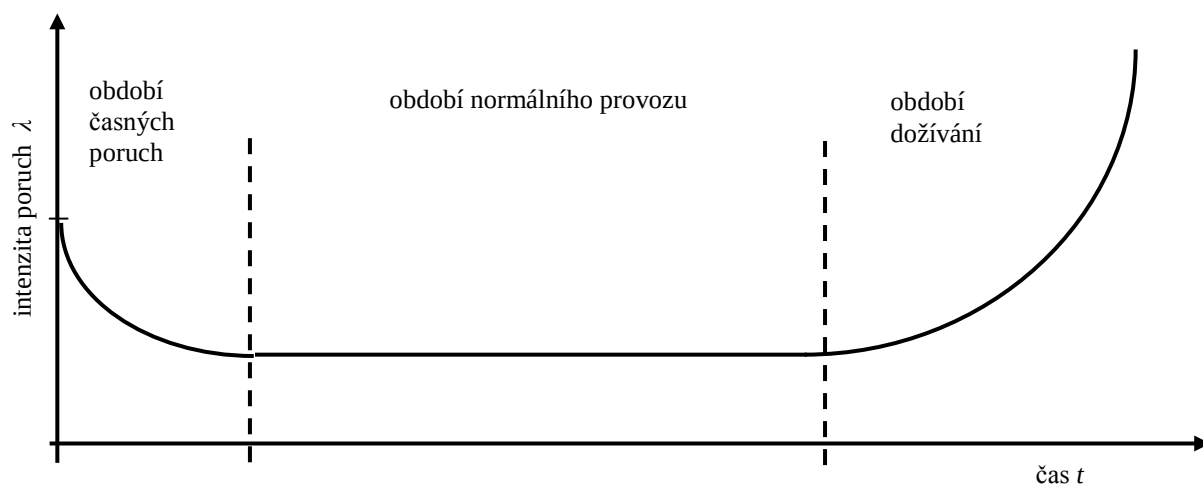
Podrobnějšímu výkladu o jednotlivých, nejčastěji používaných rozdělení v teorii spolehlivosti je věnována kapitola Stanovení spolehlivostních ukazatelů parametrickými metodami.

Teoretické zákony rozdělení pravděpodobnosti

Získáme-li průběhy ukazatelů spolehlivosti na základě empirických zkoušek, snažíme se tyto průběhy aproximovat analytickým vyjádřením zákona rozdělení pravděpodobnosti. Především se využívají ty

zákony, které dobře vyjadřují účinky fyzikální podstaty sledované náhodné veličiny (procesy stárnutí, opotřebení, koroze, špičkových zatížení, vlivů okolního prostředí atd.).

Vodítkem pro volbu teoretického zákona rozdělení bývá průběh intenzity poruch $\lambda(t)$. Na obr. 9 je typický průběh poruch u neobnovovaných objektů. Podle typického tvaru se tento průběh nazývá "vanová křivka".



Obr. 9 Průběh intenzity poruch - vanová křivka

Exponenciální zákon rozdělení

Jestliže má intenzita poruch $\lambda(t)$ sledovaného souboru přibližně konstantní průběh, má náhodná veličina ζ exponenciální zákon rozdělení pravděpodobnosti. Pro ukazatele spolehlivosti lze psát [1], [5]:

- intenzita poruch

$$\lambda(t) = \lambda = \text{konst.} \quad (33)$$

- pravděpodobnost poruchy

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad (34)$$

- pravděpodobnost bezporuchového provozu

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (35)$$

- hustota pravděpodobnosti

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (36)$$

- střední doba bezporuchového provozu

$$T_s = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda} \quad (37)$$

- zaručená doba bezporuchového provozu T_α ,

$$R(T_\alpha) = \alpha \quad (38)$$

je definovaná vztahem

$$T_\alpha = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{1}{\alpha}\right) \quad (39)$$

Jako teoretický zákon rozdělení pravděpodobnosti pro stanovení ukazatelů spolehlivosti v intervalu časných poruch a technického života dle obr. 8 lze užít lineární kombinaci dvou exponenciálních zákonů. Přitom vycházíme z předpokladů, že soubor obsahuje část objektů, u nichž se porucha po uvedení do provozu neobjeví, a část objektů, u nichž se porucha objeví.

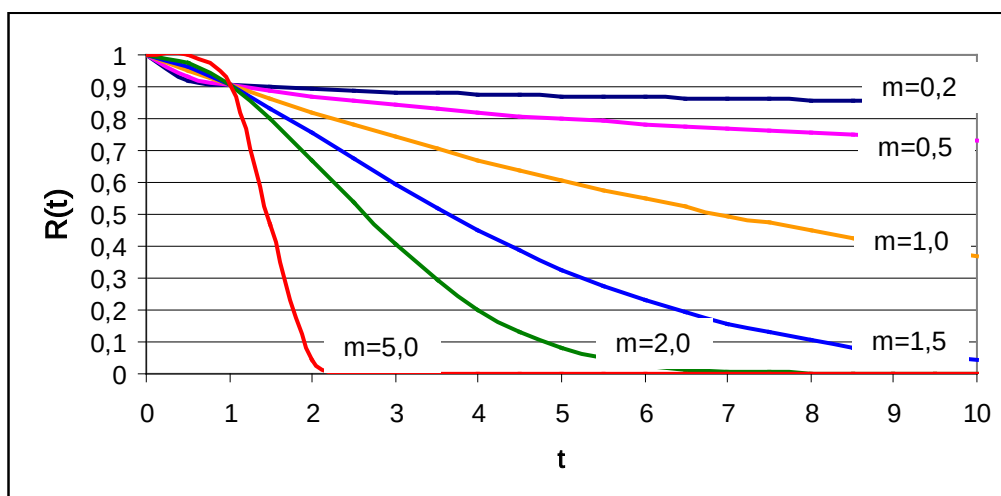
Pro popis ukazatelů spolehlivosti pro období stárnutí lze užít všeobecně známé normální (Gaussovo) rozdělení pravděpodobnosti. V případech, kdy intenzita poruch nevykazuje typický průběh, užíváme často Weibullův zákon rozdělení pravděpodobnosti. Model má dva parametry - mocnitele m a lineární míru času t_0 . V tomto případě lze pro pravděpodobnost bezporuchového provozu psát

$$R(t) = e^{-\frac{t^m}{t_0}} \quad (40)$$

Intenzitu poruch lze vyjádřit

$$\lambda(t) = \frac{m}{t_0} \cdot t^{m-1} \quad (41)$$

Velkou variabilitu průběhů $R(t)$ v závislosti na hodnotě parametru m ilustruje obr. 10.

Obr. 10 Průběh ukazatele $R(t)$ pro Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti

Pro hodnotu parametru $m = 1$ vychází jako zvláštní případ Weibullova rozdělení exponenciální zákon s hodnotou $\lambda = 1/t_0$.



Řešený příklad

Zadání

Pro soubor technologických objektů téhož typu byl získán odhad pravděpodobnosti poruchy za dobu $t_0 = 150$ hodin $F(t_0) = 0,01$. Za předpokladu platnosti exponenciálního zákona určete intenzitu poruch λ , ukazatele bezporuchovosti $T_{0,95}$ a T_s a pravděpodobnost bezporuchového provozu $R(t)$ pro $t_1 = 30$ hodin a $t_2 = 660$ hodin..

Řešení

Stanovení parametru exponenciálního rozdělení, tj. intenzity poruch λ

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \Rightarrow \lambda = -\frac{1}{t} \cdot \ln(1 - F(t))$$

$$\lambda = -\frac{1}{150} \cdot \ln(1 - 0.01) = 6,700 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$$

Výpočet

- střední doby bezporuchového provozu $T_s = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{6,700 \cdot 10^{-5}} = 14925,37 \text{ h}$

- zaručená doba bezporuchového provozu $T_\alpha = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{1}{\alpha}\right)$

$$T_{0,95} = \frac{1}{6,700 \cdot 10^{-5}} \cdot \ln\left(\frac{1}{0,95}\right) = 765,57 \text{ h}$$

Pravděpodobnosti bezporuchového provozu $R(t) = e^{-\lambda \cdot t}$

pro $t_1 = 30$ hodin $R(30) = e^{-6,700 \cdot 10^{-5} \cdot 30} = 0,9979$

pro $t_1 = 660$ hodin $R(660) = e^{-6,700 \cdot 10^{-5} \cdot 660} = 0,9567$

**Řešený příklad***Zadání*

Při spolehlivostní zkoušce pro soubor objektů stejného typu, pro které platí exponenciální zákon rozdělení se střední dobou bezporuchového provozu $T_s = 50\,000$ hodin, určete dobu T_1 , resp. T_2 po kterou se 90% resp. 95% objektů souboru neporouchá.

Řešení:

$$T_s = \frac{1}{\lambda} \text{ [h]} \Rightarrow \lambda = \frac{1}{T_s} \text{ [h}^{-1} \text{]}$$

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \Rightarrow t = -\frac{\ln[R(t)]}{\lambda} \text{ [h]}$$

$$t = -\frac{\ln[R(t)]}{\lambda} = -\frac{\ln[R(t)]}{\frac{1}{T_s}} = -\ln[R(t)] \cdot T_s$$

a) 90 % : $t = -\ln(0.90) \cdot 50000 = 5268 \text{ h}$

b) 95 % : $t = -\ln(0.95) \cdot 50000 = 2564 \text{ h}$

**Řešený příklad***Zadání*

Pro technologický objekt je požadována zaručovaná doba bezporuchovosti $T_{0.9} = 100$ hodin. Platí-li pro tento objekt exponenciální zákon rozdělení dob do poruchy určete požadovanou hodnotu intenzity poruch λ a střední dobu bezporuchového provozu T_s .

Řešení:

$$T_{0.9} = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln\left[\frac{1}{\alpha}\right] \text{ [h]} \Rightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{0.9}}{\ln\left[\frac{1}{\alpha}\right]} \Rightarrow \lambda = \frac{\ln\left[\frac{1}{\alpha}\right]}{T_{0.9}} \text{ [h}^{-1} \text{]}$$

$$T_s = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\frac{\ln\left[\frac{1}{\alpha}\right]}{T_{0.9}}} = \frac{T_{0.9}}{\ln\left[\frac{1}{\alpha}\right]} \text{ [h]}$$

$$\lambda = \frac{\ln\left[\frac{1}{0.9}\right]}{100} = 0.00105 \text{ h}^{-1}$$

$$T_s = \frac{100}{\ln\left[\frac{1}{0.9}\right]} = 949 \text{ h}$$



CD-ROM_1 – Weibullovo rozdělení (ANIMACE_4_A)

V rámci animace je možné si vyzkoušet vykreslování distribuční funkce Weibullova rozdělení pro různé parametry.



CD-ROM_2 – Bezporuchovost (ANIMACE_4_B)

V rámci animace je možné si vyzkoušet řešení příkladů z dané oblasti spolehlivostních výpočtů.



Shrnutí pojmů

Vanová křivku, ukazatele bezporuchovosti při exponenciální pravděpodobnosti poruch, exponenciální a Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti a oblast jejich užití v teorii spolehlivosti.



Otázky

1. Co vyjadřuje vanová křivka.
2. Kdy se v teorii spolehlivosti užívají exponenciální a Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti.
3. Která veličina (ukazatel bezporuchovosti) je parametrem exponenciálního rozdělení.

4.4. Ukazatele životnosti, bezpečnosti a skladovatelnosti



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat základní ukazatele životnosti, bezpečnosti a skladovatelnosti
- popsat jednotlivé náhodné veličiny popisující tyto vlastnosti spolehlivosti.



Výklad

Vyjádření těchto dílčích vlastností spolehlivosti jsou založena na popisu rozdělení pravděpodobnosti odpovídající náhodné veličiny [1]. Definice jednotlivých pojmů byly uvedeny v rámci vymezení obsahu spolehlivosti.

Ukazatele životnosti

Jako ukazatele životnosti se užívají číselné charakteristiky náhodné veličiny ζ , která znamená náhodnou dobu do vzniku mezního stavu a která se nazývá technický život.

- střední hodnota technického života - střední život

$$T_z = M(\zeta) \quad (42)$$

- α -kritická hodnota náhodné veličiny se vyjadřuje v procentech a používá se pro ni označení γ . Lze psát

$$\gamma = 100 \alpha \quad [\%] \quad (43)$$

Ukazatel T_γ se nazývá gamaprocentní život a je definován vztahem

$$R(T_\gamma) = \frac{\gamma}{100} \quad (44)$$

Hodnoty γ je nutno volit z doporučené řady 99,99 - 99,9 - 99,0 - 95 - 90 - 80 - 65. Např. pro T_{90} platí $R(T_{90}) = 0,9$ vyjadřuje, že přibližně 90 % objektů souboru nedosáhne mezního stavu do doby T_{90} .

Ukazatele bezpečnosti

Pravděpodobnostní chování náhodné veličiny je vyjádřeno stejně jako u bezporuchovosti, ale ukazatele jsou vztaženy pouze ke kritickým poruchám, což se projevuje v názvu ukazatele. Např. $\lambda(t)$ je intenzita kritických poruch.

Číselné charakteristiky náhodné veličiny ζ , tj. T_{SK} je střední doba do kritické poruchy, T_{aK} je zaručená doba do kritické poruchy.

Ukazatele skladovatelnosti

Ukazatele skladovatelnosti jsou popisem náhodné veličiny vyjádřené dobou skladování nebo přepravy, do jejíhož ukončení se uchovávají hodnoty předepsaných parametrů objektu ve stanovených mezích. Jsou definovány:

- střední doba skladovatelnosti,
- α -kritická hodnota, vyjádřená v procentech γ ($\gamma=100-\alpha$), která se nazývá gamaprocentní doba skladovatelnosti.

**Shrnutí pojmů**

Životnost, bezpečnost, skladovatelnost, definovat základní ukazatele, jednotlivé náhodné veličiny popisující tyto vlastnosti spolehlivosti

**Otázky**

1. Definujte životnost, bezporuchovost a skladovatelnost.
2. Vyjmenujte základní ukazatele těchto spolehlivostních vlastností.
3. Charakterizujte náhodné veličiny popisující tyto spolehlivostní vlastnosti

5 SPOLEHLIVOST OBNOVOVANÝCH OBJEKTŮ

5.1. Ukazatele spolehlivosti obnovovaných objektů



Čas ke studiu: 2,5 hodiny



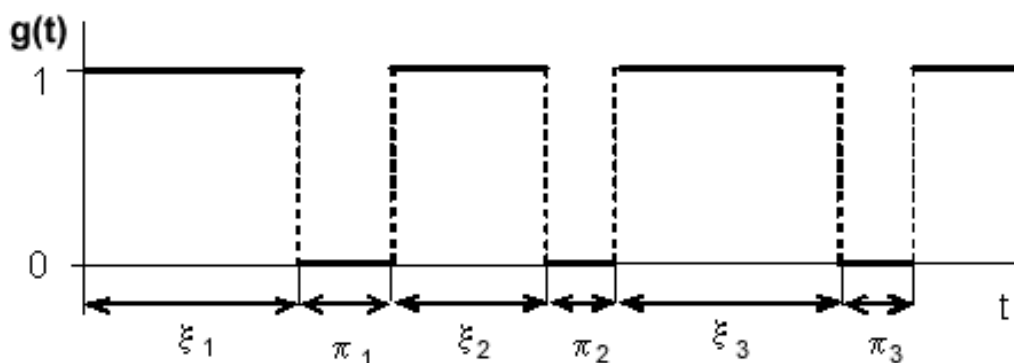
Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat proces obnovy (obecný, jednoduchý), pohotovost,
- popsat opravitelnost a základní ukazatele opravitelnosti, základní ukazatele pohotovosti,
- vyřešit základní úlohy stanovení ukazatelů opravitelnosti a pohotovosti.



Výklad

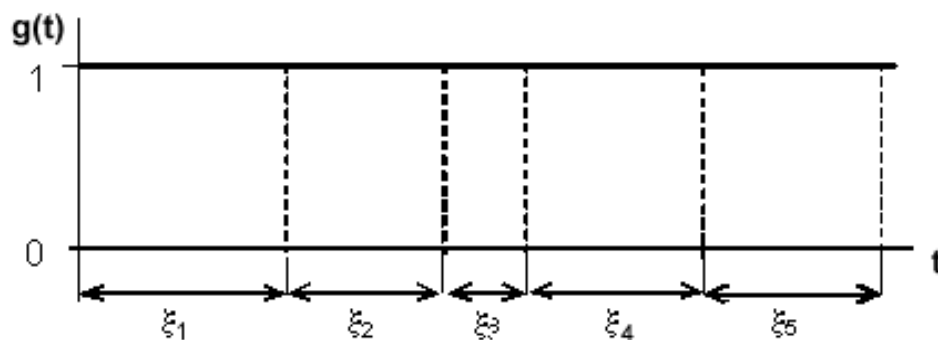
Nejjednodušším záznamem pro spolehlivostní charakteristiky obnovovaného objektu je záznam časového sledu změn stavu, tj. přechodů z provozuschopného stavu do stavu poruchy a zpět. Označíme-li provozuschopný stav hodnotou $g(t) = 1$ a stav poruchy $g(t) = 0$, znázorňuje obr. 11 příklad zobrazení stavové funkce $g(t)$ obnovovaného objektu.



Obr. 11 Průběh procesu obnovy objektu

Průběh funkce $g(t)$ je určen posloupností náhodných veličin ξ_i a π_i ($i = 1, 2, \dots$), kde ξ_i je náhodná doba bezporuchového provozu, měřená od okamžiku ukončení obnovy po $(i-1)$ poruše do okamžiku vzniku i -té poruchy a π_i je náhodná doba obnovy po vzniku i -té poruchy.

Je nutno rozlišovat pojem *oprava* - souhrn činností konaných po poruše s cílem navrátit objekt do provozuschopného stavu - a pojem *obnova* - jev spočívající v obnovení schopnosti objektu plnit požadované funkce podle technických podmínek (jedná se o teoretický pojem). Náhodný proces určený střídáním ξ a π je nazýván obecným procesem obnovy. Pokud se jedná o proces s okamžitou obnovou nebo se zanedbatelnou délkou doby obnovy, hovoříme o jednoduchém procesu obnovy (obr. 12).



Obr. 12 Průběh jednoduchého procesu obnovy objektu

Jednou z dílčích vlastností spolehlivosti obnovovaných objektů je opravitelnost.

Ukazatele opravitelnosti popisují chování náhodné veličiny π [1]:

- distribuční funkce $G(t)$ definuje pravděpodobnost obnovení provozuschopnosti v intervalu $\langle 0, t \rangle$

$$G(t) = P(\pi \leq t) \quad (45)$$

- hustota pravděpodobnosti obnov provozuschopnosti $g(t)$ v intervalu $\langle 0, t \rangle$

$$g(t) = \frac{dG(t)}{dt} \quad (46)$$

- intenzita obnov provozuschopnosti

$$\mu(t) = \frac{g(t)}{1 - G(t)} \quad (47)$$

- střední doba obnovení provozuschopnosti T_0 , definovaná jako střední hodnota náhodné veličiny

$$T_0 = M[\pi] = \int_0^{\infty} (1 - G(t)) dt \quad (48)$$

- zaručená doba obnovování provozuschopnosti T_0 , definovaná jako α -kritická hodnota náhodné veličiny

$$G(T_{0\alpha}) = 1 - \alpha \quad (49)$$

V případě platnosti $\mu(t) = \mu = \text{konst.}$, tj. platnosti exponenciálního zákona rozdělení pravděpodobností je

$$G(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (50)$$

a střední doba obnovení provozuschopnosti je

$$T_o = \frac{1}{\mu} \quad (51)$$

Méně často se užívá funkce vyjadřující pravděpodobnost opačného jevu, že obnova nebyla ukončena do času t .

Další kvantitativní hodnocení spolehlivosti obnovovaných objektů vychází z popisu náhodné veličiny τ_r - vyjadřující cyklus úplné obecné obnovy, která je měřena od prvního uvedení objektu do provozu [5], [10]

$$\tau_r = \sum_{i=1}^r \xi_i + \sum_{i=1}^r \pi_i \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (52)$$

Při hodnocení této náhodné veličiny se vychází z předpokladu, že náhodné jevy bezporuchového provozu ξ_i a náhodné jevy procesu obnovy π_i jsou popsány stejnými distribučními funkcemi $F(t)$ pro ξ_i a $G(t)$ pro π_i stejnými středními hodnotami $T_s = M[\xi_i]$ a $T_o = M[\pi_i]$, kde T_s je střední doba bezporuchového provozu a T_o je střední doba obnovy provozuschopnosti.

Ukazatelem spolehlivosti může být funkce obnovy $H(t)$, mající význam středního počtu obnov v časovém intervalu $<0, t>$, resp. její derivace $h(t)$ nazývaná hustota obnov. Tyto parametry lze analyticky určovat jen pro několik málo zákonů rozdělení pravděpodobností.

Při zkoumání činnosti objektů v delším časovém období bývá cílem určit pravděpodobnost, že objekt např. v časovém okamžiku $t = t_p$, kdy je po něm požadována provozuschopnost, bude v pohotovosti k činnosti. Tato pravděpodobnost se nazývá součinitel pohotovosti $k_p(t)$.

Součinitel pohotovosti $k_p(t)$ je komplexním ukazatelem zahrnujícím bezporuchovost a opravitelnost objektu v podmínkách provozu. Je podmíněn časovým okamžikem $t = t_p$ v závislosti na součiniteli obnovy ρ , který je definován

$$\rho = \frac{M[\pi]}{M[\xi]} = \frac{T_o}{T_s} = \frac{\lambda}{\mu} \quad (53)$$

Součinitel pohotovosti je proměnný v čase a za předpokladu platnosti exponenciálních zákonů rozdělení náhodných veličin π a ξ má exponenciální průběh, který s narůstajícím časem konverguje k hodnotě k_p , která se nazývá stacionární součinitel pohotovosti

$$k_p = \frac{1}{1+\rho} = \frac{T_s}{T_s+T_o} = \frac{\mu}{\lambda+\mu} \quad (54)$$

Tato hodnota charakterizuje stabilizovaný obecný proces obnovy, u něhož je pravděpodobnost přechodu z bezporuchového stavu provozu do poruchového prostoje konstantní a vyjadřuje pravděpodobnost, že objekt bude provozuschopný v libovolném časovém okamžiku mimo plánovaná období oprav.

Pro odhad součinitele pohotovosti se užívá vztah

$$\hat{k}_p = \frac{\sum t_{pi}}{\sum t_{pi} + \sum t_{oi}} \quad (55)$$

kde $\sum t_{pi}$ je kumulativní doba bezporuchového provozu,

$\sum t_{oi}$ kumulativní doba obnovy.

Vedle součinitele podobnosti se užívá i jeho doplněk, který se nazývá součinitel prostoje

$$1 - \hat{k}_p = \frac{\rho}{1 + \rho} = \frac{T_o}{T_s + T_o} \quad (56)$$

Využití objektu se posuzuje součinitelem technického využití k_{tv} . Ten je určen poměrem střední doby setrvání objektu v bezporuchovém stavu k celkové době používání za stejné období. Pro statistický bodový odhad platí:

$$\hat{k}_{tv} = \frac{\sum t_{pi}}{\sum t_{pi} + \sum t_{oi} + \sum t_{ui}} \quad (57)$$

kde t_{pi} je kumulativní doba bezporuchového provozu,

t_{oi} kumulativní doba obnovy,

t_{ui} kumulativní doba předepsané údržby na objektu.

Mezi možnosti dosahovat krátké doby údržbové činnosti patří zlepšování pohotovosti technické obsluhy, zajištění dostupnosti náhradních dílů, zvýšení kvalifikace údržby, zavedení diagnostických prostředků atd.

Dalším důležitým ukazatelem spolehlivosti obnovovaných objektů je součinitel operační pohotovosti k_{op} . Pro stabilizovaný obecný proces obnovy je určen

$$k_{op}(t) = k_p \cdot R(t) \quad (58)$$

kde k_p je stacionární součinitel pohotovosti,

$R(t)$ pravděpodobnost bezporuchového provozu.

Tento součinitel vyjadřuje pravděpodobnost, že obnovovaný objekt bude v časovém okamžiku t_p v pohotovosti a od tohoto okamžiku bude pracovat v provozuschopném stavu po dobu t .

**Řešený příklad****Zadání**

Určete ukazatele opravitelnosti intenzitu obnov μ a střední dobu obnovení provozuschopnosti T_O technologického zařízení za předpokladu platnosti exponenciálního zákona, jestliže jsou obnovy provozuschopnosti zařízení po poruše realizovány v 75 % případů do 24 hodin.

Řešení :

$$G(t) = 1 - e^{-\mu \cdot t} \Rightarrow \mu = -\frac{1}{t} \cdot \ln[1 - G(t)] \text{ [h}^{-1}\text{]}$$

$$T_O = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{-\frac{1}{t} \cdot \ln[1 - G(t)]} \text{ [h]}$$

$$\mu = -\frac{1}{24} \cdot \ln(1 - 0.75) = 0.0578 \text{ h}^{-1}$$

$$T_O = \frac{1}{-\frac{1}{24} \cdot \ln(1 - 0.75)} = 17.31 \text{ h}$$

**Řešený příklad****Zadání**

Pro stabilizovaný obecný proces obnovy objektu stanovte požadavek na jeho střední dobu obnovy, je-li při dané střední době bezporuchového provozu $T_S = 1000$ hod požadována hodnota koeficientu pohotovosti $k_p \geq 0.975$.

Řešení:

$$K_p = \frac{T_S}{T_O + T_S} \Rightarrow T_O = \frac{T_S - K_p \cdot T_S}{K_p}$$

$$T_O = \frac{1000 - 0.975 \cdot 1000}{0.975} = 25.64$$

$$T_O \geq 25.64 \text{ h}$$

**Řešený příklad****Zadání**

Určete součinitel pohotovosti stabilizovaného obecného procesu obnovy pro soubor objektů téhož typu, je-li jejich součinitel obnovy 0,1.

Řešení :

$$K_p = \frac{\mu}{\mu + \lambda}$$

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \Rightarrow \lambda = \rho \cdot \mu$$

$$K_p = \frac{\mu}{\mu + \rho \cdot \mu} = \frac{\mu}{\mu \cdot (1 + \rho)} = \frac{1}{1 + \rho}$$

$$K_p = \frac{1}{1 + 0.1} = 0.909$$



Řešený příklad

Zadání

Určete ukazatel bezporuchovosti intenzitu poruch strojního zařízení, za předpokladu platnosti exponenciálního zákona, jestliže jsou obnovy provozuschopnosti objektu po poruše realizovány průměrně v 70% případů do 24 hodin a součinitel obnovy je roven $2.5 \cdot 10^{-3}$.

Řešení :

$$G(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \Rightarrow \mu = -\frac{1}{t} \ln(1 - G(t)) \text{ [h}^{-1} \text{]}$$

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \Rightarrow \lambda = \rho \cdot \mu = \rho \cdot \left(-\frac{1}{t} \ln[1 - G(t)] \right) = -\frac{\rho}{t} \ln[1 - G(t)] \text{ [h}^{-1} \text{]}$$

$$\lambda = -\frac{2.5 \cdot 10^{-4}}{24} \ln(1 - 0.7) = 1.25 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$$



CD-ROM_3 – Opravitelnost (ANIMACE_5_A)

V rámci animace je možné si vyzkoušet řešení příkladů z dané oblasti spolehlivostních výpočtů.



CD-ROM_4 – Pohotovost (ANIMACE_5_B)

V rámci animace je možné si vyzkoušet řešení příkladů z dané oblasti spolehlivostních výpočtů.



Shrnutí pojmů

Proces obnovy (obecný, jednoduchý), pohotovost, základní ukazatele pohotovosti a jejich vlastnosti, opravitelnost, základní ukazatele opravitelnosti a jejich vlastnosti.



Otázky

1. Definujte a srovnajte obecný proces obnovy a jednoduchý proces obnovy.
2. Charakterizujte pojem pohotovost a vyjmenujte základní ukazatele pohotovosti.
3. Vysvětlete, co vyjadřuje ukazatel pohotovosti.
4. Vysvětlete význam ukazatelů technického využití a operační pohotovosti.
5. Charakterizujte pojem opravitelnost.
6. Vyjmenujte základní ukazatele opravitelnosti.

6 ZKOUŠKY SPOLEHLIVOSTI

6.1. Matematický aparát zkoušek spolehlivosti



Čas ke studiu: 2,5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Charakterizovat matematický aparát zkoušek spolehlivosti, zkušební plán, parametry pro zkoušky spolehlivosti, zkušební plány,
- popsat konfidenční interval, druhy konfidenčních intervalů, parametry konfidenčního intervalu,
- definovat zkoušky spolehlivosti dle různých kritérií.



Výklad

Základním prostředkem pro zjištění a kontrolu ukazatelů spolehlivosti jsou zkoušky spolehlivosti. Jejich výsledkem jsou nejen hodnoty spolehlivostních ukazatelů, ale po doplnění analýzou poruch a návrhem opatření k odstranění jejich příčin mohou sloužit ke zlepšení těchto ukazatelů.

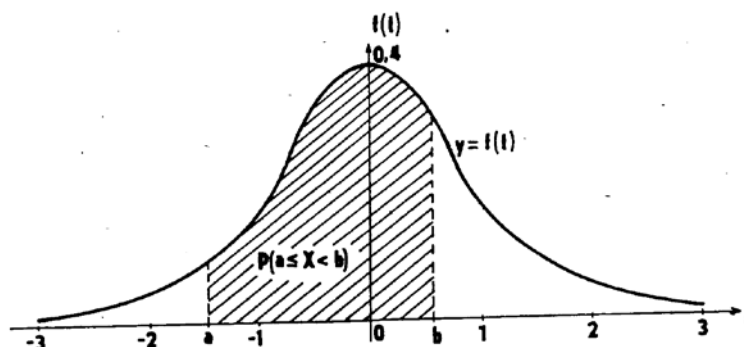
Provádění zkoušek spolehlivosti na základním statistickém souboru bývá prakticky nerealizovatelné nebo nevhodné. Proto se zkoušky provádějí s náhodným výběrem základního souboru. Jeho rozsah se volí tak, aby výsledky zkoušky informovaly s přijatelnou přesností o spolehlivostních vlastnostech základního souboru a aby zkouška byla prakticky realizovatelná. Výsledek zkoušky je náhodnou veličinou a je proto odhadem skutečné hodnoty sledovaného parametru. Z charakteristik náhodného výběru je sledovaný parametr popsán jedním číslem, kterému říkáme bodový odhad. Tento odhad má být konzistentní, tj. pro rozsah výběru $n \rightarrow \infty$ má odhad konvergovat ke skutečné hodnotě odhadovaného parametru, dále má být nestranný, tj. jeho střední hodnota má být rovna hodnotě odhadovaného parametru, a má být vydatný, tj. má mít nejmenší rozptyl ze všech nestranných odhadů parametru.

Přesnost bodového odhadu sledovaného parametru základního souboru je hodnocena pomocí konfidenčního intervalu. Odhadujeme-li sledovaný parametr základního souboru bodovým odhadem pomocí výběrové charakteristiky, je konfidenční interval dán hodnotami sledovaného parametru, ve kterém se skutečná hodnota nalézá s pravděpodobností $1 - \alpha$. Předem stanovené riziko odhadu je vyjádřeno hodnotou významnosti α a $1 - \alpha$ je konfidenční úroveň odhadu. Je-li odhadovaný parametr T , označíme dolní mez T_d a horní mez T_h , pak pro konfidenční interval platí

$$P(T_d < T < T_h) = 1 - \alpha \quad (59)$$

Konfidenční interval může být oboustranný nebo jednostranný, pokud se použije pro určení tohoto intervalu jen dolní nebo horní mez (obr. 13). Nejčastěji se volí hodnoty $1 - \alpha$ rovny 0,99, 0,90, ev. 0,60.

O tom, jestli se užije oboustranný konfidenční interval nebo jeho jednostranná verze, rozhoduje význam odhadovaného parametru. Tak nás např. zajímá horní konfidenční mez intenzity poruch, dolní konfidenční mez střední doby bezporuchového provozu T_s , dolní mez pravděpodobnosti bezporuchového provozu $R(t)$ apod.



Obr. 13. Oboustranný konfidenční interval

Pro výpočet mezí konfidenčního intervalu odhadu sledovaného parametru základního souboru se používá rozdělení χ^2 (chí kvadrát) a rozdělení t (Studentovo) [7]. Obě tato rozdělení jsou funkcí dvou proměnných v a α . Proměnná v je spolu s konfidenční úrovní uvedena v závorce za symbolem funkce χ^2 nebo t a závisí na počtu pozorování (na počtu stupňů volnosti). Například funkce $\chi^2_{1-\alpha}(v)$ příp. $t_{1-\alpha}(v)$ označuje rozdělení χ^2 příp. rozdělení t pro konfidenční úroveň $1 - \alpha$ a pro počet pozorování v . Výběr kvantilů pro obě rozdělení je zpracován tabulkově. Vzorce pro výpočet jednotlivých ukazatelů spolehlivosti pomocí uvedených rozdělení jsou obsaženy v normách nebo jiných publikacích [5], [6]. Další úlohou při zpracování výsledků spolehlivostních zkoušek je ověřování statistické hypotézy. Při tom se vychází z hypotézy o zákonu rozdělení v základním souboru a ověřuje se, zda přijaté předpoklady jsou v souladu s alternativní hypotézou danou pozorováním. Ověřování se provádí pomocí statistických testů. Často se užívá testu dobré shody Kolmogorova - Smirnova nebo testu Pearsonova (test χ^2) [7].



Příloha 1 – Konfidenční interval a zkušební plán

Pro výpočet mezí konfidenčního intervalu odhadu sledovaného parametru základního souboru, jehož bodový odhad je znám musíme znát:

- **zkušební plán zkoušky**
- **rozsah náhodného výběru**
- **rozdělení pravděpodobnosti základního souboru**
- **požadavek na konfidenční úroveň $1 - \alpha$**

Zkušební plán zkoušky

Označení zkušebního plánu je kombinace tří symbolů (zpravidla v uzavřených v hranatých závorkách a oddělenými čárkami), kde na prvním místě je uveden počet zkoumaných objektů (n), na druhém místě je symbol U , R nebo M , vztahující se k nahrazování, resp. k obnově porušených prvků, a na třetím místě je buď r (pokud zkouška končí při výskytu r -té poruchy), nebo t (pokud se zkouška ukončí po uplynutí předepsané doby t); např. zkušební plán založený na plynulém sledování n neopravitelných objektů až do poruchy posledního výrobku se označí $[n, U, n]$. Ukončí-li se sledování, resp. zkouška ihned po výskytu poruchy u r -tého výrobku, jde o zkušební plán $[n, U, r]$ atd.

Za malá písmena se dosazují konkrétní čísla.

Přehled označení zkušebních plánů.

Označení zkušebního plánu	Význam označení
$[n, ., .]$	Postup založený na pozorování n objektů
$[., U, .]$	Postup, při kterém neobnovované objekty nejsou nahrazovány po poruše v době pozorování
$[., R, .]$	Postup, při kterém neobnovované objekty jsou nahrazovány po poruše v době pozorování, takže původní počet objektů zůstává zachován (případ procesu obnovy)
$[., M, .]$	Postup, při kterém jsou pozorované objekty po každé poruše obnoveny (případ obecného procesu obnovy)
$[., Tr, .]$	Postup při tzv. useknutém souboru, kde chybí informace od určité části celkového počtu provozovaných neobnovovaných výrobků
$[., ., r]$	Postup, při kterém se pozorování ukončí při r -té poruše
$[., ., t]$	Postup, při kterém se pozorování ukončí po uplynutí určité doby zkoušky t
$[., ., (r,t)]$	Postup, při kterém se pozorování ukončí při r -té poruše nebo po uplynutí určité doby t , podle toho, který jev nastane dříve

**Řešený příklad****Zadání**

Příklad stanovení intenzity poruch pro zkušební plán $[n U r]$ dle ČSN 358001

Řešení :

Bodový odhad

$$\hat{\lambda} = \frac{r}{T}$$

r počet poruch u sledované skupiny
 T celková kumulovaná provozní doba

$$T = \left(\sum_{i=1}^r t_i \right) + (n - r) \cdot t_z$$

n počet zkoušených objektů (rozsah výběru)
 r počet zjištěných poruch
 t_i provozní doba do poruchy i -tého objektu
 t_z doba zkoušky (do poruchy r -tého objektu)

Výpočet konfidenčního intervalu

$$\lambda_d = \frac{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}}(2 \cdot r)}{2 \cdot T} \quad \lambda_h = \frac{\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}(2 \cdot r + 2)}{2 \cdot T}$$

pro praktické výpočty a pro $1-\alpha = 0,9$ ($r > 0$)

$$\lambda_d = \frac{1}{k_2} \cdot \hat{\lambda} \quad \lambda_h = \frac{1}{k_1} \cdot \hat{\lambda}$$

kde k_1, k_2 jsou tabelované hodnoty dle ČSN 367001

pokud $r = 0$ $\lambda_h = 3 \cdot \hat{\lambda}$

6.2. Rozdělení a příprava zkoušek spolehlivosti

Zkoušky spolehlivosti lze dělit podle těchto hledisek:

- podle cílů, které se zkouškami sledují,
- podle spolehlivostních ukazatelů,
- podle doby trvání,
- podle místa realizace.

Podle cílů se zkoušky spolehlivosti dělí na určující a ověřovací. Při určujících zkouškách se stanovují neznámé hodnoty ukazatelů spolehlivosti. Provádějí se při vývoji nových objektů, změnách konstrukce a technologie apod. U zkoušek ověřovacích se zkoumá, zda ukazatele spolehlivosti dosahují udávaných nebo předepsaných hodnot. Provádějí se při sériové výrobě, při předávacích zkouškách atd.

Podle spolehlivostních ukazatelů se rozlišují zkoušky bezporuchovosti, životnosti, opravitelnosti, udržovatelnosti.

Podle doby trvání lze zkoušky dělit na ty, které jsou ukončovány po poruše všech n objektů výběrového souboru. Tyto zkoušky jsou obvykle označovány jako dlouhodobé. Je-li zkouška ukončena dříve, než dojde k poruše všech zkoušených objektů, označuje se jako zkouška zkrácená. Zkouška může být rovněž ukončena před uplynutím předem stanovené doby t , zkoušky ukončené po výskytu předem stanoveného počtu poruch r , zkoušky ukončené dosažením předem stanovených podmínek přijetí či zamítnutí. U zrychlených zkoušek lze zkrátit doby trvání zkoušky tím, že se provádí ve ztížených podmínkách.

Podle místa realizace se zkoušky dělí na laboratorní a provozní. U laboratorních zkoušek je výhodou snadnější kontrola a udržování stejných podmínek pro celý výběrový soubor, nedají se však zajistit všechny podmínky, ve kterých je objekt provozován. To zajišťují provozní zkoušky spolehlivosti. Ty

jsou nutné zejména pro složitější objekty, ale i pro ty se v důležitějších případech zřizují nákladné zkušební polygony, které v sobě spojují výhody laboratorních i provozních zkoušek.

Z uvedeného je patrná značná složitost i různorodost problematiky realizace zkoušek spolehlivosti. Proto se před každou vypracovává plán zkoušek spolehlivosti a její postup a vyhodnocení je usměrňován technickými normami.

V příloze 2 je uvedena rozsáhlejší klasifikace zkoušek spolehlivosti. Závěrem je třeba upozornit na náročnost registrace a analýzy dat při zkouškách. Je třeba vyhodnotit časový průběh poruch, selhání, chyb, příčin vzniku, doby detekce, odstranění a řadu dalších organizačních i technických opatření. Při hodnocení ukazatelů spolehlivosti se všechny zaznamenané poruchy rozdělí na započítávané a nezapočítávané a dále se rozliší na závislé a nezávislé, způsobené vnějšími a vnitřními příčinami, způsobené obsluhou atd.



Příloha 2 – Klasifikace zkoušek spolehlivosti

1. *Podle dílčí spolehlivostní vlastnosti:*
 - 1.1. Zkoušky bezporuchovosti
 - 1.2. Zkoušky životnosti
 - 1.3. Zkoušky skladovatelnosti
2. *Podle cíle (účelu) zkoušky:*
 - 2.1. Vývojové zkoušky
 - 2.2. Typové (kvalifikační) zkoušky
 - 2.3. Určující zkoušky spolehlivosti
 - 2.4. Ověřovací zkoušky spolehlivosti
 - 2.5. Třídící zkoušky
 - 2.6. Zkoušky vhodnosti jednotlivých variant konstrukčního řešení
 - 2.7. Zkoušky zařízení za účelem stanovení normálních podmínek používání, přepravy a skladování
 - 2.8. Zkoušky s cílem stanovit nejrychlejší a nejekonomičtější způsob zjištění defektu (poruchy, poškození)
3. *Podle výrobní etapy objektu:*
 - 3.1. Zkoušky v různých etapách vývoje
 - 3.2. Zkoušky prototypů (výrobních modelů)
 - 3.3. Zkoušky hotových výrobků
4. *Podle časového rozvrhu zkoušky:*
 - 4.1. Cyklické zkoušky
 - 4.2. Zkoušky stupňovaným zatížením
 - 4.3. Postupné zkoušky
5. *Podle trvání zkoušky:*
 - 5.1. Zkoušky po předem stanovenou dobu
 - 5.2. Zkoušky do předem stanoveného počtu poruch
 - 5.3. Zkrácené zkoušky
6. *Podle pracovních podmínek*
 - 6.1. Zkoušky ve jmenovitých pracovních podmínkách
 - 6.2. Zkoušky za normálních pracovních podmínek
 - 6.3. Zrychlené zkoušky
7. *Podle druhu zatížení*

- 7.1. Dynamické (mechanické) zkoušky
- 7.2. Elektrické zkoušky
- 7.3. Klimatické zkoušky
- 8. *Podle zkušební metody (režimu)*
 - 8.1. Laboratorní zkoušky
 - 8.2. Zkoušky za provozních podmínek
 - 8.3. Zkoušky bez obnovy
 - 8.4. Zkoušky s obnovou



Shrnutí pojmů

Konfidenční interval, druhy konfidenčních intervalů, parametry konfidenčního intervalu, matematický aparát zkoušek spolehlivosti, zkušební plán, parametry pro zkoušky spolehlivosti, zkušební plány, zkoušky spolehlivosti dle různých kritérií.



Otázky

1. Definujte konfidenční interval, druhy konfidenčních intervalů.
2. Vysvětlete pojem zkušební plán a uveďte druhy zkušebních plánů.
3. Klasifikujte zkoušky spolehlivosti dle různých kritérií.

7 HODNOCENÍ SPOLEHLIVOSTI SYSTÉMŮ

7.1. Spolehlivostní modely systémů



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat sériový model, paralelní model, modely s obecnou strukturou, minimální řez a minimální cestu,
- popsat metody stanovení spolehlivosti systémů,
- vyřešit základní příklady z oblasti spolehlivosti systémů.



Výklad

U systémů je pojem objekt nahrazen termíny systém (soustava), podsystém a prvky, ze kterých se tyto systémy skládají. Spolehlivost systému se pak hodnotí ve vztahu ke spolehlivosti prvků. Systémový přístup k řešení problému vyžaduje provádět spolehlivostní analýzu jednotlivých struktur systémů již v etapě návrhu [1]. Rozhodující význam zde má struktura technická, funkční a informační. Organizační struktura umožňuje posuzovat vliv lidského činitele na spolehlivost systému. U kybernetických systémů, jejichž činnost je podmíněna algoritmickou strukturou je spolehlivost dána spolehlivostí jednotlivých algoritmů jako uzlů algoritmické struktury. Pro úplnou spolehlivostní syntézu, tj. kvantitativní výpočet ukazatelů spolehlivosti systému, slouží metody strukturální spolehlivosti, které umožňují stanovit spolehlivostní chování systému pro známé vlastnosti prvků jeho technické, algoritmické, informační a organizační struktury na základě analýzy jak spolehlivost systémů závisí na spolehlivosti těchto prvků. Nejrozšířenější je výpočet spolehlivosti technické struktury systému, tj. z hlediska měřicích a řídících prvků, ochran, signalizace, registrace apod. Odhady získané v etapě návrhu mají pouze informativní a predikční charakter, ale umožňují navrhovat opatření ke zvýšení spolehlivosti, která se v dalších etapách technického života systému zpřesňují a zdokonalují na základě zkoušek spolehlivosti.

Při řešení spolehlivostního modelu je třeba se úvodem zabývat volbou kritéria poruch. U systémů se hodnotí strukturální spolehlivost té jeho části, která zabezpečuje plnění určité funkce. Spolehlivostní ukazatele těchto funkcí je nutno dát do souvislosti se spolehlivostí technických prostředků i se spolehlivostí prvků dalších struktur sloužících k jejich zabezpečení.

Realizace této koncepce vede k rozkladu struktury (technické, algoritmické, informační atd.) na subsystémy a prvky jejichž spolehlivost se zkoumá odděleně ve vztahu k funkci, kterou zabezpečují.

Pomocným hlediskem při rozčlenění bývá snaha vyčlenit konstrukční a funkční podsystémy tvořící celky, podléhající jako celky obnově, podsystémy, které lze snadno popsat spolehlivostními ukazateli apod..

Pro rozlišení kritérií poruch platí členění uvedené již dříve.

U systémů je ve srovnání s objekty častější případ dělení poruch na stálé narušení provozuschopnosti a na krátkodobé narušení provozuschopnosti, které vymizí samovolně (selhání), kdy není třeba odstraňovat příčinu poruch nápravnou údržbou, ale postačí odstranit následky selhání.

Důležitou etapou, která přesahuje rámec technického řešení a zasahuje oblast dodavatelsko-odběratelských vztahů je stanovení požadovaných hodnot ukazatelů spolehlivosti systému. U některých jsou požadované hodnoty ukazatelů spolehlivosti určeny legislativními předpisy - jaderná energetika, ekologické systémy a pod. U dalších, určených zpravidla pro běžné průmyslové účely, se vychází z ekonomických analýz tak, aby celkové náklady na vývoj, projekt, výrobu a užití byly v ekonomickém smyslu optimální. Pro uživatele je zde pro vytýčení spolehlivosti pro dané podmínky vodítkem spolehlivost předchozí generace výrobků. Jestliže standardní úroveň spolehlivosti nevyhovuje a objeví se požadavky jejího zvýšení, děje se tak zpravidla za cenu zvýšení nákladů a prodloužení dodacích lhůt.

Spolehlivostní model slouží k predikčním výpočtům ukazatelů spolehlivosti a vyjadřuje vztah mezi definovaným popisem struktury systému a spolehlivostními vlastnostmi systému v daných podmínkách použití.

Pro vytváření dvoustavových spolehlivostních modelů se užívá metody spolehlivostních blokových schemat.

Pro vícestavové modely se užívá následujících způsobů modelování:

- vyjádření množinou vzájemně odlišných stavů,
- využitím stromu poruch nebo stromu událostí,
- Markovovy spolehlivostní modely,
- využitím statistického modelování.

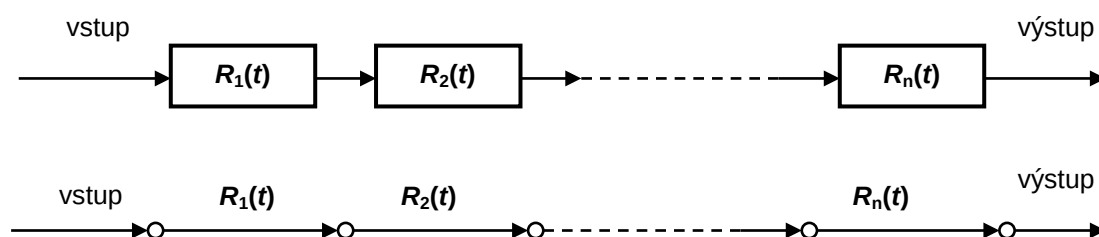
7.2. Spolehlivostní modely vyjádřené pomocí blokových schémat

Pro vyjádření zvolené technické struktury se prvky zobrazují jako bloky. Porucha prvku je představována neprůchodností daného bloku. Blokové schéma tak rovněž vyjadřuje, jak porucha systému závisí na poruchách podsystémů či prvků. Přitom se předpokládá vzájemná nezávislost poruch prvků. Vedle blokových schémat se užívá zobrazení orientovaným grafem, kdy hrany odpovídají prvkům a uzly grafu signálům uvnitř i vně systémů [5], [8].

Mezi základní spojení patří:

- sériové spojení prvků (sériový poruchový model),
- paralelní spojení (paralelní poruchový model).

Sériové zapojení představuje systém navržený s minimálním nutným počtem prvků.



Obr. 14. Sériové spolehlivostní schéma

Pravděpodobnost bezporuchového provozu $R(t)$ sériového systému je dána součinem pravděpodobností bezporuchového stavu všech jeho prvků

$$R(t) = \prod_{i=1}^N R_i(t) \quad (60)$$

Podobně pro pravděpodobnost poruch platí

$$F(t) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - F_i(t)] \quad (61)$$

Intenzita poruch je dána

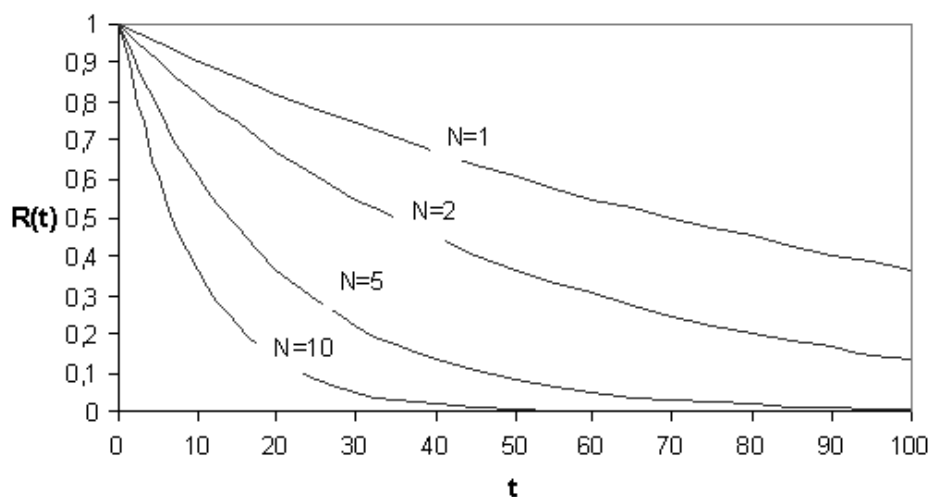
$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(t) \quad (62)$$

V případě exponenciálního rozdělení dob do poruchy všech N prvků sériového systému s parametry λ_i platí:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t}$$

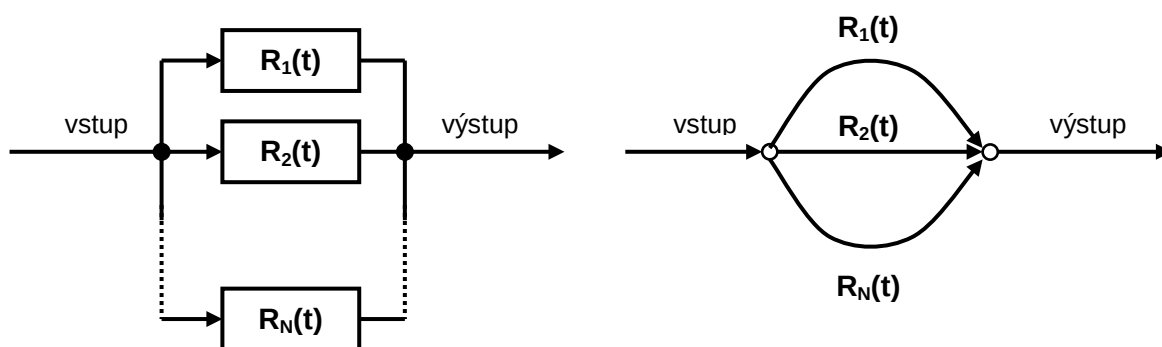
$$T_s = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} \quad (63)$$

Průběhy $R(t)$ pro sériové spojení jsou pro různý počet prvků uvedeny na obr. 15.



Obr. 15 Průběh $R(t)$ pro sériově spojené prvky

Paralelní poruchový model vyjadřuje použití nadbytečnosti. Část prvků je užita pro zvýšení bezporuchovosti systému a tvoří zálohování systému. Opět předpokládáme, že jednotlivé prvky mají stejné spolehlivostní vlastnosti. U paralelního spojení K prvků vznikne porucha systému teprve tehdy, nastane-li porucha všech K prvků. Spolehlivostní blokové schéma paralelního modelu je na obr. 16.



Obr. 16 Paralelní spolehlivostní schéma

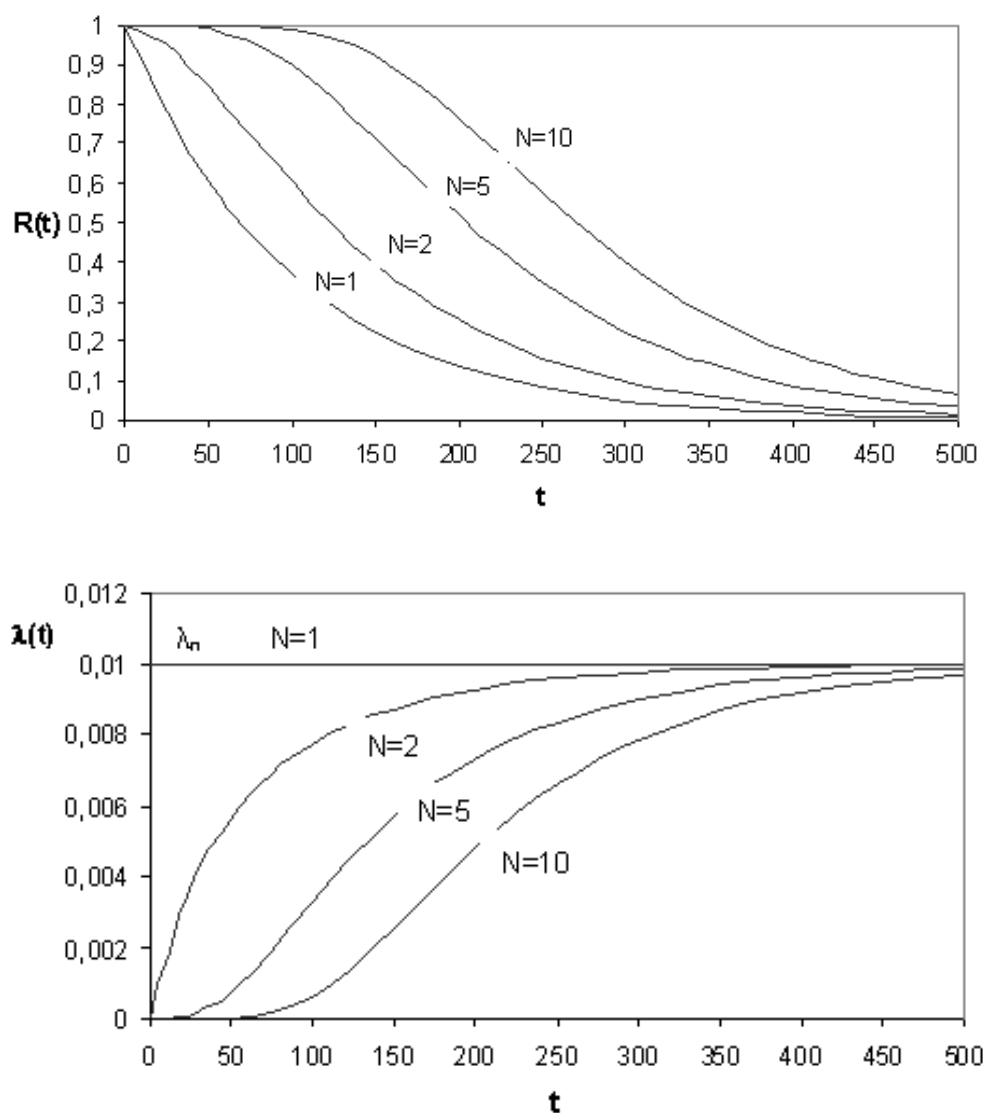
Pro pravděpodobnost poruchy platí

$$F(t) = \prod_{i=1}^N F_i(t) \quad (64)$$

Pro pravděpodobnost bezporuchového provozu platí

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - R_i(t)) \quad (65)$$

Průběhy pravděpodobnosti bezporuchového provozu $R(t)$ pro různý počet paralelně zapojených prvků s exponenciálním rozdělením dob do poruchy jsou vyneseny na obr. 17.



Obr. 17 Průběh $R(t)$ a $\lambda(t)$ pro různé hodnoty počtu paralelně zapojených prvků

I v případě, že pro všechny prvky systému platí exponenciální zákon rozdělení dob do poruchy, pro celý systém to neplatí. Intenzita poruch není konstantní a pouze asymptoticky se blíží intenzitě poruch λ jednotlivých prvků (viz obr. 17).

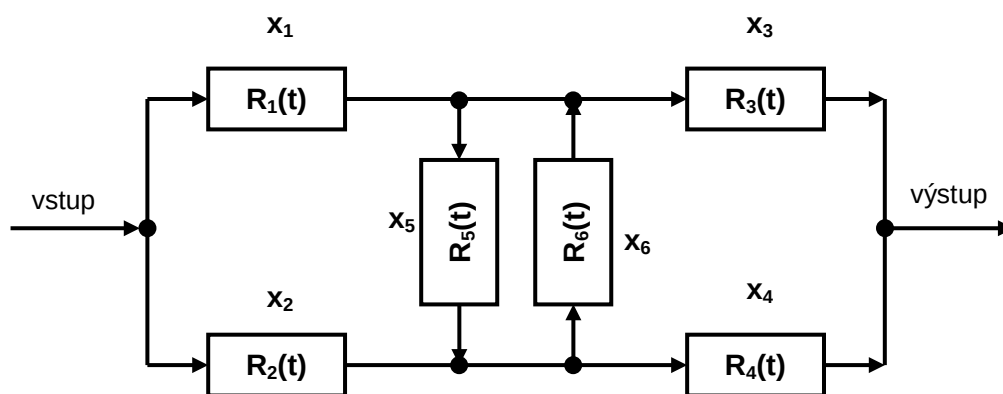
Uvedená metoda sériového i paralelního spolehlivostního modelu se hodí i pro spojení sériově-paralelní a **systémy s obecnou strukturou**. Pro modely s obecnou strukturou se užívají metody

převodu jejich struktury na kombinaci sériově-paralelních spojení (metoda rozkladu). Dále pak metoda minimálních cest a minimálních řezů [5].

Každý spolehlivostní model můžeme rozdělit na cesty a hranové řezy, pomocí nichž počítáme spolehlivostní vlastnosti systému, který model reprezentuje.

Minimální cesta ve struktuře libovolného typu je minimální soubor provozuschopných elementů takových, že výskyt poruchy kteréhokoliv z nich způsobí přechod systému ze stavu provozuschopného do stavu poruchového.

Minimální řez v libovolné struktuře je minimální soubor neprovozuschopných elementů takových, že obnova kteréhokoliv z nich způsobí přechod systému ze stavu poruchového do stavu provozuschopného. Příkladem může být struktura dle obr. 18.



Obr. 18 Určování minimálních cest a kritických řezů

V dané struktuře na obr.18 lze definovat:

- minimální cesty:

$$x_1 x_3, x_2 x_4, x_1 x_4 x_5, x_2 x_3 x_6$$

- minimální hranové řezy:

$$x_1 x_2, x_3 x_4, x_1 x_4 x_6, x_2 x_3 x_5$$



Řešený příklad

Zadání

Technologický systém obsahuje 8 prvků pro které platí exponenciální zákon a porucha kteréhokoliv prvku způsobí poruchu celého systému, jejich pravděpodobnosti poruch za pevnou dobu t_0 jsou: 0.001, 0.003, 0.0008, 0.0015, 0.0004, 0.0003, 0.001, 0.007. Určete pravděpodobnost bezporuchového provozu za dobu t_0 .

Řešení :

$$R(t) = 1 - F(t)$$

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^N R_i(t)$$

$$R_s(t_0) = \prod_{i=1}^8 R_i(t) = \prod_{i=1}^8 [1 - R_i(t_0)] = [1 - 0.001] \cdot [1 - 0.003] \cdot [1 - 0.008] \cdot [1 - 0.0015] \cdot [1 - 0.0004] \cdot [1 - 0.0003] \cdot [1 - 0.001] \cdot [1 - 0.007] = 0.97798$$



Řešený příklad

Zadání

Technologický systém se skládá ze 6-ti skupin stejných prvků, počty těchto z hlediska spolehlivostních vlastností stejných prvků v jednotlivých skupinách jsou 5,7,3,10,12 a 8; pravděpodobnosti poruch skupin za pevnou dobu T jsou 0.01; 0.008; 0.015; 0.001; 0.0005 a 0.005. Porucha libovolného prvku způsobí poruchu systému. Určete pravděpodobnost bezporuchového provozu systému za dobu T a určete výpočtem, u které skupiny prvků zvýšení bezporuchovosti prvku přinese největší efekt z hlediska spolehlivosti tohoto systému.

Řešení :

$$F(t) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - F_i(t)]$$

$$R(t) = 1 - F(t)$$

při předpokladu užití prvků se stejnými spolehlivostními vlastnostmi lze psát

$$F(t) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - F_i(t)] \Rightarrow F_i(t) = 1 - \sqrt[N]{1 - F(t)}$$

$$F_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^6 [1 - F_i(t)] = 1 - \left[\frac{(1 - 0.01) \cdot (1 - 0.008) \cdot (1 - 0.015) \cdot (1 - 0.001) \cdot (1 - 0.0005) \cdot (1 - 0.005)}{(1 - 0.001) \cdot (1 - 0.0005) \cdot (1 - 0.005)} \right] = 0.039$$

pro 1. skupinu prvků získáváme $F_{0,1}(T) = 1 - \sqrt[5]{1 - 0.01} = 0.002$

potom

$$F_{0,1}(t) = 0.002$$

$$F_{0,2}(t) = 0.0016$$

$$F_{0,3}(t) = 0.003$$

$$F_{0,4}(t) = 0.0002$$

$$F_{0,5}(t) = 0.0001$$

$$F_{0,6}(t) = 0.001$$

Největší efekt z hlediska spolehlivosti systému přinese zvýšení bezporuchovosti prvků 3-tí skupiny.

**Řešený příklad***Zadání*

Paralelní systém tvoří 3 prvky se stejnými spolehlivostními vlastnostmi, o nichž je známo, že pro rozdělení jejich dob do poruchy platí exponenciální zákon. Určete pravděpodobnost poruchy těchto prvků, jestliže pravděpodobnost bezporuchového provozu tohoto systému je 0.999.

Řešení:

$$R(t) = 1 - (1 - R_0)^3 \Rightarrow R_0 = 1 - \sqrt[3]{1 - R(t)}$$

$$R_0 = 1 - \sqrt[3]{1 - 0.999} = 0.9$$

$$F_0 = 1 - R_0 = 1 - 0.9 = 0.1$$

**Řešený příklad***Zadání*

Určete počet k prvků paralelního technologického systému se stejnými ukazateli bezporuchovosti $R_0 = 0,9$; aby bylo dosaženo požadované hodnoty pravděpodobnosti bezporuchového provozu systému $R_S = 0,99$.

Řešení:

$$R_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^K F_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^K (1 - R_i(t))$$

$$R_S(t) = 1 - (1 - R_0(t))^K \Rightarrow 1 - R_S(t) = (1 - R_0(t))^K$$

po zlogaritmování dostáváme

$$K \geq \frac{\log(1 - R_S(t))}{\log(1 - R_0(t))} \geq \frac{\log(1 - 0.99)}{\log(1 - 0.9)} \geq 2$$

**Řešený příklad***Zadání*

Zaručená doba $T_{0,9}$ prvků je 100 hodin, pro prvky platí exponenciální zákon rozdělení dob do poruchy. Určete počet K prvků paralelního systému, je-li požadována hodnota systému $T_{0,9} = 1000$ hodin.

Řešení:

$$T_\alpha = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{1}{\alpha}\right) \Rightarrow \lambda = \frac{\ln\left(\frac{1}{\alpha}\right)}{T_\alpha}$$

$$\lambda_0 = \frac{\ln\left(\frac{1}{0.9}\right)}{100} = 0.00105 \text{ [h}^{-1}\text{]}$$

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t}$$

$$t = 1000 \text{ hodin} \quad R_0(t) = e^{-0.00105 \cdot 1000} = 0.34994$$

$$R_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^K F_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^K (1 - R_i(t))$$

$$R_S(t) = 1 - (1 - R_0(t))^K \Rightarrow 1 - R_S(t) = (1 - R_0(t))^K$$

po zlogaritmování dostáváme

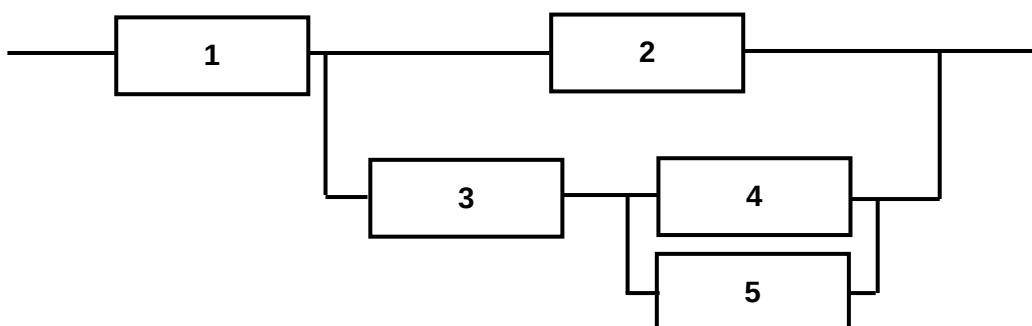
$$K \geq \frac{\log(1 - R_S(t))}{\log(1 - R_0(t))} \geq \frac{\log(1 - 0.9)}{\log(1 - 0.34994)} \geq 5.348 = 6$$



Řešený příklad

Zadání

Určete $R(t_0)$ smíšeného spolehlivostního systému s blokovým schématem (viz. obr.) pro $t_0 = 1000$ h, platí-li pro prvky exponenciální zákon rozdělení dob do poruchy s parametry $\lambda_1 = 6 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$; $\lambda_2 = 1.1 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$; $\lambda_3 = 7.5 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$; $\lambda_4 = 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$; $\lambda_5 = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ h}^{-1}$.



Řešení:

1. Stanovení hodnot pravděpodobnosti bezporuchového provozu pro jednotlivé prvky v čase $t_0 = 1000$ h při předpokladu platnosti exponenciálního zákona podle vztahu (5.39), tzn.

$$R_i(t_0) = e^{-\lambda_i \cdot t_0} \quad \text{pro} \quad i = 1, 2, \dots, 5$$

$$R_1 = 0.94176$$

$$R_2 = 0.89583$$

$$R_3 = 0.92774$$

$$R_4 = 0.86070$$

$$R_5 = 0.77880$$

2. Systém řešíme postupně, tzn. rozdělením systému na dílčí subsystému. Výpočet subsystému s prvky č. 4, 5, který řešíme jako paralelní systém užitím vztahů (5.154), tedy

$$R_{4,5} = 1 - (1 - R_4) \cdot (1 - R_5)$$

3. Rozšíříme výpočet o prvek č. 3, řešíme tedy subsystém s prvky 3, 4, 5, který řešíme jako sériový systém užitím vztahů (5.141)

$$R_{3,4,5} = R_3 \cdot R_{4,5} = R_3 \cdot [1 - (1 - R_4) \cdot (1 - R_5)]$$

4. Jako paralelní zapojení řešíme subsystém s prvky 2, 3, 4, 5

$$R_{2,3,4,5} = 1 - (1 - R_2) \cdot (1 - R_{3,4,5}) = 1 - (1 - R_2) \cdot (1 - (R_3 \cdot [1 - (1 - R_4) \cdot (1 - R_5)]))$$

5. Přidáním prvku č. 1 k předchozímu subsystému a řešením jako sériový systém získáme vztah resp. hodnotu pro celý řešený systém

$$R_S = R_{1,2,3,4,5} = R_1 \cdot R_{2,3,4,5} = R_1 \cdot (1 - (1 - R_2) \cdot (1 - (R_3 \cdot [1 - (1 - R_4) \cdot (1 - R_5)])))$$

$$R_S = 0.93186$$



CD-ROM_5 – Sériový model (ANIMACE_7_A)

V rámci animace je možné si vyzkoušet řešení příkladů z dané oblasti spolehlivostních výpočtů.



CD-ROM_6 – Paralelní model (ANIMACE_7_B)

V rámci animace je možné si vyzkoušet řešení příkladů z dané oblasti spolehlivostních výpočtů.



CD-ROM_7 – Obecné modely (ANIMACE_7_C)

V rámci animace je možné si vyzkoušet řešení příkladů z dané oblasti spolehlivostních výpočtů.



Shrnutí pojmů

Metody stanovení spolehlivosti systémů, sériový model, paralelní model, modely s obecnou strukturou, minimální řez a minimální cesta.



Otázky

1. Vyjmenujte metody vyjádření spolehlivosti systémů.
2. Charakterizujte základní vlastnosti sériového poruchového modelu.
3. Charakterizujte základní vlastnosti paralelního poruchového modelu.
4. Charakterizujte systémy s obecnou strukturou.
5. Definujte pojmy minimální řez a minimální cesta.

7.3. Spolehlivostní modely v podobě vzájemně odlišných stavů systémů



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat deduktivní a induktivní přístup ke spolehlivosti systémů,
- popsat metody FTA a FMEA.



Výklad

Spolehlivostní model lze zobrazit graficky v podobě blokového schématu (orientovaného grafu), kde každý blok či uzel odpovídá technickému stavu systému, každá spojnice (resp. hrana) jednomu možnému přechodu mezi jeho stavy.

Výpočetní postup ukazatelů spolehlivosti umožňuje metoda seznamu stavů. Zkoumá se množina stavů systému, jejichž výskyt určuje, ve kterém z možných stavů se systém nachází. Metoda je vhodná i pro středně složité systémy, je však pracná a nepřehledná.

Velmi častá je analýza spolehlivosti systému pomocí stromu poruch, resp. stromu událostí [8].

Systém se analyzuje z hlediska poruch nejen podle okamžitého stavu jeho prvků, ale i z hlediska toho, jak se informace o poruchovém stavu systému šíří. Reálný systém se rozčlení na prvky, moduly, podsystémy a zkoumá se, jak jejich eventuální porucha bude mít účinek na systém jako celek. V podstatě jsou možné dva přístupy - deduktivní a induktivní.

Deduktivní přístup

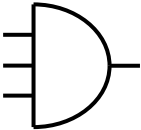
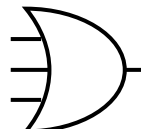
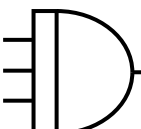
Pro určitou definovanou událost, např. kritickou poruchu se hledají kombinace příčin v poruchách dílčích podsystémů a prvků. Tato metoda je označována jako strom poruch resp. FTA (Fault Tree Analysis). Strom poruch se zobrazuje jako grafický logický model vyjadřující vazby vedoucí k vrcholové události. Těch však může být i několik a proto velké systémy mohou mít i několik stromů poruch.

Strom poruch umožňuje:

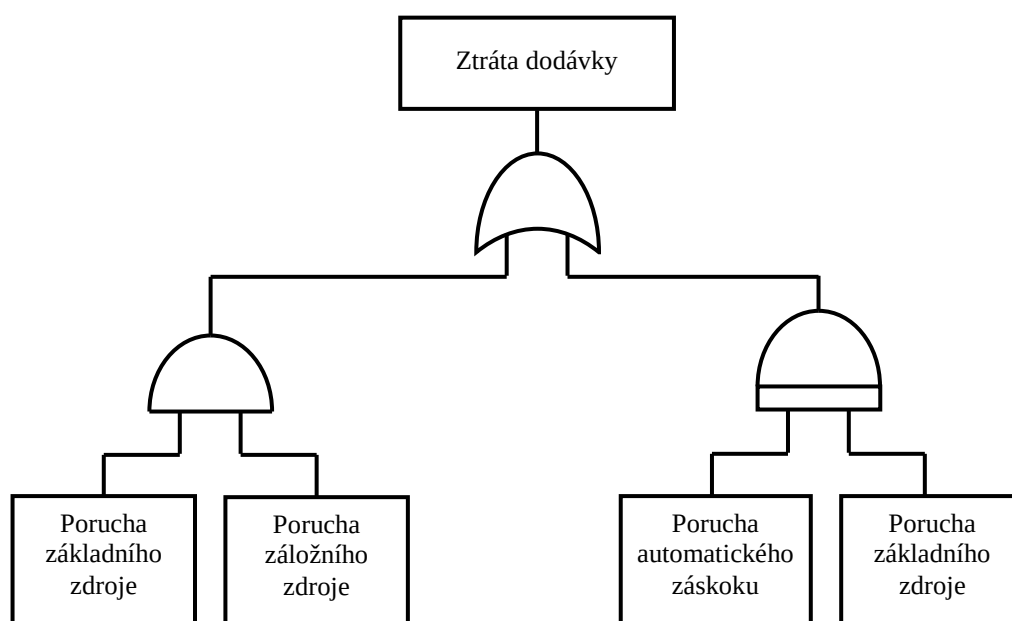
- zaměřit analýzu systému na hledání poruch,
- vyhledat aspekty systému důležité z hlediska poruch,
- vytvořit grafický pohled na systém pro provedení změn v systému,
- vytvořit kvalitativní i kvantitativní analýzu,

- pochopit funkci systému.

Jedná se o grafický model paralelních i sériových kombinací poruch prvků, které mohou způsobit definovanou nežádoucí událost. Grafická interpretace je souhrnem symbolů hradel definujících logické vazby, komentátorových a transferových značek. Některé ze symbolů hradel jsou uvedeny na obr. 19. Nižší událost představuje vstup do hradla, vyšší událost je jeho výstupem. Příkladem jejich využití je uvedeno na obr.20.

Symbol hradla	Název hradla	Vysvětlení
	A Logický součin	Konjunkce - k poruše na výstupu dojde jestliže vznikne porucha na všech vstupech
	NEBO Logický součet	Disjunkce - porucha na výstupu se objeví, jestliže vznikne porucha alespoň na jednom vstupu
	Prioritní A	Porucha na výstupu se objeví, jestliže jsou poruchy na všech vstupech, ale v určitém pořadí (pokud není vyznačeno platí pravidlo, že priority se řadí zleva doprava)
		další symboly

Obr. 19 Příklad symbolů logických hradel



Obr. 20 Znáznornění stromu poruch

Mezi základními prvky stromu poruch lze najít matematické souvislosti, z kterých se vyhodnocují parametry spolehlivosti (součinitel pohotovosti, bezporuchovosti, atd.). Jeho předností je interpretace pomocí Boolovy algebry.

Kvalitativní vyhodnocení stromu poruch zahrnuje:

- stanovení minimálních kritických řezů tj. kombinace poruch prvků, které způsobují poruchu systému,
- stanovení kvalitativní významnosti prvku tj. kvalitativní pořadí prvků podle způsobu přispívání k poruše systému.

Kvantitativní vyhodnocení zahrnuje:

- číselné pravděpodobnosti,
- kvantitativní významnost tj. pořadí prvků a řezů podle přispívání k poruše systému.

Důležitou etapou kvantitativního hodnocení je citlivostní analýza. Hodnotí se vliv prvků resp. kritických řezů na spolehlivost systému.

Tato vyhodnocení se provádějí zpravidla s počítačovou podporou.

Induktivní přístup

Vychází se z analýzy možných stavů prvků a podsystémů a ke zvolenému kritériu poruchy se hledají projevy těchto poruch v celém systému. Reálný systém je tak vytvářen v podobě stromu událostí (FMEA - Failure Mode and Effect Analysis nebo FMECA (Failure Mode Effect and Criticality Analysis)).

Jedná se o grafickou reprezentaci všech událostí, které se mohou v systému vyskytnout. Strom událostí se větví směrem od iniciační události podle počtu uvažovaných podsystémů. V praxi se tento způsob nejčastěji používá u bezpečnostních systémů.

Metoda se využívá především ke kvalitativní analýze spolehlivosti a bývá analýzou pro ostatní postupy.

Užívá se např. v konstrukci FMEA - K, kde se analyzují příčiny, důsledky a závažnost poruch, které mohou pramenit z konstrukčních nedostatků.

Ve výrobě FMEA - V se provádí analýza poruch vznikajících z nedostatků ve výrobním procesu.

Užívá se zde informačního systému spolehlivosti v podniku.

Při praktickém uplatňování se provádí:

- rozdělení zařízení (stroje) na podskupiny,
- centralizovaný sběr dat,
- zařazení výskytu poruchy do podskupiny,

- stanovení závažnosti poruchy,
- určení pravděpodobnosti výskytu,
- určení rizikového čísla (dle zvoleného kritéria závažnosti),
- stanovení kritických míst,
- rozbor příčin poruch,
- nápravný zásah (např. průběžné sledování - monitoring).

V podniku jsou vytvořeny formuláře, které se soustavně vyplňují. Navazuje se na systém sběru dat o poruchách a opravách strojů.

Obě metody se v poslední době často užívají pro stanovení kritických poruch. Mají však svá omezení spočívající v rychlém nárůstu pracnosti u složitých systémů. Pomocí těchto metod se obtížně analyzují vratné jevy, tj. udržovatelnost a obnovitelnost.



Shrnutí pojmů

Deduktivní a induktivní přístup ke spolehlivosti systémů, metody FTA a FMEA.



Otázky

1. Co znamená deduktivní a induktivní přístup ke stanovení spolehlivosti systémů.
2. Charakterizujte metodu FTA.
3. Charakterizujte metodu FMEA.

7.4. Markovovy spolehlivostní modely



Čas ke studiu: 3,5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat základní princip metody Markovových modelů, statistického modelování spolehlivosti systémů,
- stanovit soustavu diferenciálních rovnic představující dílčí řešení metody Markovových modelů.



Výklad

Nejčastější interpretací více-stavových modelů spolehlivosti systémů jsou Markovovy spolehlivostní modely [5], [12]. Jsou založeny na použití teorie náhodných procesů. Náhodný proces Markovova typu má konečný počet stavů, u kterých přechody mezi jednotlivými stavy mohou nastávat náhodně v čase. Markovův proces je pak definován jako konečný náhodný proces, který se skládá z posloupnosti provozních stavů systému, přičemž pravděpodobnost kteréhokoliv stavu závisí pouze na stavu, který bezprostředně předchází a je nezávislá na stavech dřívějších. Takový proces se nazývá homogenní Markovův proces. Tento proces lze charakterizovat jako funkci dvou náhodných veličin a to stavu systému a doby v níž je tento stav sledován. Nejčastějšími případy jsou ty, kdy proměnná vyjadřující stav systému a čas jsou veličiny diskrétní. Hovoříme o Markovových řetězcích. V případě, že stav je veličina diskrétní a čas je veličina spojitá, hovoříme o vlastních Markovových procesech.

Je-li znám počet možných stavů systému N , jsou-li známy všechny pravděpodobnosti P přechodů mezi jednotlivými stavy a jsou-li všechny počáteční stavy specifikovány, jde o typický Markovův proces jehož matematické vyjádření umožní vypočítávat pravděpodobnost jednotlivých stavů.

Uvažujme proces $X(t)$, $t \in N_0$, kde náhodné veličiny X mají zvolený definiční obor $\{1, 2, \dots, n\}$. Takový proces může popisovat chování systému, který je v kterémkoliv čase $t \in N_0 = \{0, 1, 2, \dots\}$ v některém z n stavů. Jev $X(k) = j$ potom znamená, že systém je v čase k ve stavu j . Pro zjednodušení se označuje X_k místo $X(k)$ a uvažovaný proces je pak náhodná posloupnost $\{X_0, X_1, \dots\}$. Taková posloupnost se jmenuje Markovův řetězec, jestliže realizace veličiny X_k (stav systému v čase k) závisí pouze na realizaci X_{k-1} (předcházejícímu stavu systému) a nezávisí na předcházejícím průběhu procesu.

Platí podmíněná pravděpodobnost:

$$P(X_k = j \mid X_{k-1} = i, X_{k-2} = h, \dots, X_0 = a) = P(X_k = j \mid X_{k-1} = i) = p_{ij}(k) \quad (66)$$

Podmíněná pravděpodobnost $p_{ij}(k)$ se nazývá pravděpodobnost přechodu systému ze stavu i do stavu j v k -tém kroku.

Tyto pravděpodobnosti se sestavují do čtvercové matice řádu n , tj. do matice pravděpodobností přechodu v k -tém kroku. Tato matice se týká elementárního časového intervalu. U Markovových náhodných procesů může dojít ke změně stavu v libovolném časovém okamžiku, u Markovova řetězce tomu může být pouze v určité okamžiky tak, jak bylo popsáno výše. V obou případech však pro matici pravděpodobností přechodu (odtud název přechodová matice, někdy také stochastická matice) platí:

$$P = \begin{vmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & p_{2n} \\ p_{31} & p_{32} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdot & \cdot & \cdot & p_{nn} \end{vmatrix} \quad (67)$$

p_{ij} je podmíněná pravděpodobnost přechodu ze stavu i do stavu j . To lze jinak vyjádřit pro spojité procesy tak, že je-li $X(t) = i$ pak pravděpodobnost, že $X(t+dt) = j$ je rovna p_{ij} . U Markovova řetězce pak platí dříve uvedený vztah, že je-li $X_{k-1} = i$ pak pravděpodobnost $X_k = j$ je rovna p_{ij} .

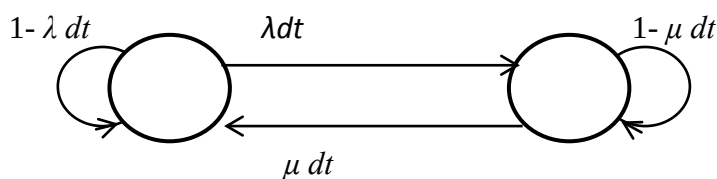
Součet pravděpodobností v řádku je roven 1, tedy

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1 \quad (68)$$

Jsou-li všechny pravděpodobnosti přechodů konstantní (nemění se v čase), označuje se Markovův proces jako homogenní.

Příklad užití matice pravděpodobností přechodů při vyjadřování spolehlivosti si můžeme znázornit na systému se dvěma stavy. Tyto stavy si lze znázornit tzv. přechodovým grafem. Jedná se o graf, kde vrcholy znázorněné kroužkem reprezentují technický stav objektu (poruchovost, bezporuchovost). Hrany spojují vždy dva takové stavy, mezi nimiž je možný přechod a vyjadřují pravděpodobnost tohoto přechodu. Někdy se k hranám místo pravděpodobností připsují intenzity přechodu, jako je například intenzita poruch nebo intenzita oprav tohoto prvku.

Mějme systém s dvěma stavy 1 a 2. Intenzity přechodů mezi stavy jsou $\lambda_{1,2} = \lambda$ a $\lambda_{2,1} = \mu$.



Obr. 21 Modelování dvoustavového systému

Matice pravděpodobnosti přechodů

$$D = \begin{vmatrix} 1 - \lambda dt & \lambda dt \\ \mu dt & 1 - \mu dt \end{vmatrix} \quad (69)$$

Zvolený náhodný proces modeluje chování obnovovaného systému, který obsahuje jediný prvek s konstantní intenzitou poruch λ a konstantní intenzitou oprav μ .

Je třeba si uvědomit, že intenzita poruch, definována

$$\lambda = \frac{\Delta B_t}{N(t) \cdot \Delta t} \quad (70)$$

vynásobená Δt tj. $\lambda \cdot \Delta t$ je podmíněná pravděpodobnost vyjadřující pravděpodobnost poruchy v časovém intervalu $t + \Delta t$ za podmínky, že do doby t byl objekt v bezporuchovém stavu. Zkoumáme-li k vyjádření této intenzity dobu bezporuchového provozu, lze tuto podmíněnou pravděpodobnost psát

$$\lambda \cdot \Delta t = P(\xi < t + \Delta t \mid \xi < t) \quad (71)$$

Dále budeme hledat pravděpodobnosti výskytu jednotlivých stavů systému. Předpokládáme, že se v čase t náhodný proces nachází ve stavu 1 s pravděpodobností $p_1(t)$, nebo ve stavu 2 s pravděpodobností $p_2(t)$, přitom $p_1(t) + p_2(t) = 1$. Pak podmíněná pravděpodobnost přechodu ze stavu 2 do stavu 1 v intervalu dt , podmíněná tím, že se systém nachází určitě ve stavu 2 je rovna μdt . Protože je ale systém ve stavu 2 s pravděpodobností $p_2(t)$, je výsledná pravděpodobnost zmíněného přechodu dána součinem pravděpodobnosti $\mu dt \cdot p_2(t)$. Podobným způsobem si lze vysvětlit i výraz $(1 - \lambda dt) \cdot p_1(t)$ jako výslednou pravděpodobnost přechodu z 1 do 1 v intervalu dt . Protože do stavu 1 v čase $t + dt$ lze dospět buď přechodem 2 až 1 nebo 1 až 1 je pravděpodobnost $p_1(t + dt)$, že se náhodný proces v čase $t + dt$ bude nacházet ve stavu 1 daném součtem obou uvedených výrazů

$$\begin{aligned} p_1(t + dt) &= (1 - \lambda dt) \cdot p_1(t) + \mu dt \cdot p_2(t) \\ p_2(t + dt) &= \lambda dt \cdot p_1(t) + (1 - \mu dt) \cdot p_2(t) \end{aligned} \quad (72)$$

Rovnice lze upravit do tvaru

$$\begin{aligned} \frac{p_1(t + \Delta t) - p_1(t)}{\Delta t} &= -\lambda p_1(t) + \mu p_2(t) \\ \frac{p_2(t + \Delta t) - p_2(t)}{\Delta t} &= \lambda p_1(t) - \mu p_2(t) \end{aligned}$$

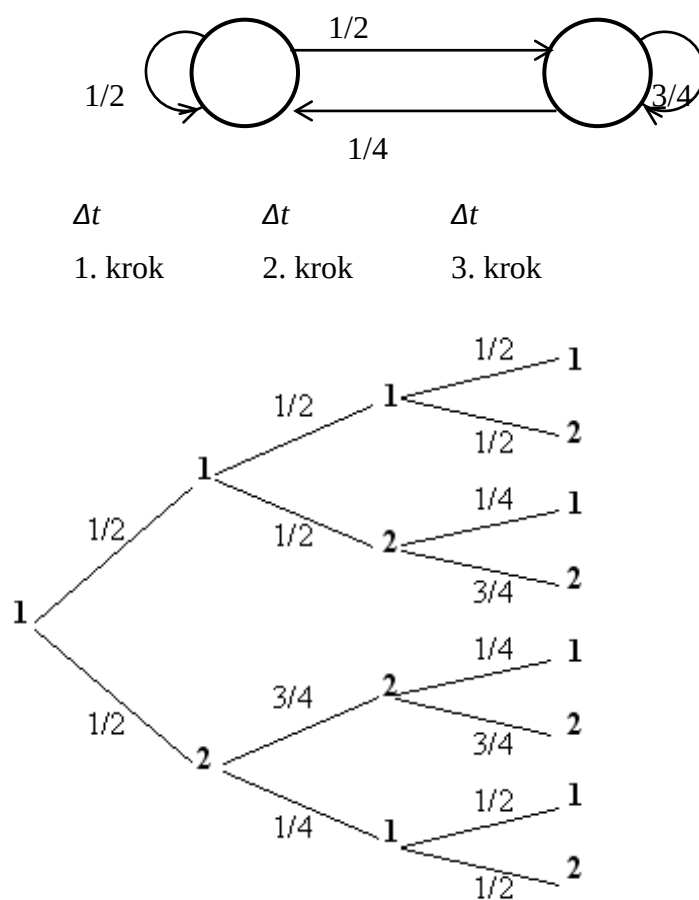
Levé strany znamenají derivace pravděpodobnosti

$$\begin{aligned} p'_1(t) &= \lambda \cdot p_1(t) + \mu \cdot p_2(t) \\ p'_2(t) &= \lambda \cdot p_1(t) - \mu p_2(t) \end{aligned} \quad (74)$$

Dostali jsme soustavu dvou lineárních diferenciálních rovnic s konstantními koeficienty tzv. Kolmogorovy rovnice pro dvě neznámé funkce $p_1(t)$ a $p_2(t)$. Řešením této soustavy můžeme pro zadané počáteční podmínky $p_1(0)$ a $p_2(0)$ získat časové průběhy pravděpodobností $p_1(t)$ a $p_2(t)$.

V mnoha případech nás zajímají jejich ustálené hodnoty $p_1(\infty)$ a $p_2(\infty)$. V tomto případě jsou pro ustálené stavy derivace nulové a soustava přejde na soustavu lineárních algebraických rovnic, které jsou řešitelné po doplnění podmínkou, že $p_1(t) + p_2(t) = 1$.

Příkladem uvedeného postupu aplikovaného na Markovovy řetězce je dvojstavový systém. Ze začátečního stavu **1** může přejít systém v 1. kroku s pravděpodobností $1/2$ do stavu **2** nebo zůstat se stejnou pravděpodobností ve stavu **1**. Dostane-li se do stavu **2** může v dalším kroku s pravděpodobností $3/4$ zůstat ve stavu **2** nebo s pravděpodobností $1/4$ přejít do stavu **1**. To lze znázornit na obr. 22 takto [8]:



krok	stav 1	stav 2	součet
1. krok	1/2	1/2	$\Sigma = 1$
2. krok	3/8	5/8	$\Sigma = 1$
3. krok	11/32	21/32	$\Sigma = 1$
.	.	.	$\Sigma = 1$
.	.	.	$\Sigma = 1$

Obr. 22 Modelování dvoustavového systému – číselný příklad

Uvedený postup je možný tehdy, jestli přechodový graf neobsahuje žádný absorpční stav, tj. stav, z kterého v předchozím grafu nevedou žádné další hrany. Pokud se systém do tohoto stavu dostane, nemůže již nabýt jiné hodnoty. Využívá se při řešení modelů neobnovovaných objektů. Při řešení se všechny absorpční stavy spojují do jednoho uzlu.

Teorie Markovových procesů umožňuje počítat ukazatele spolehlivosti u systémů s exponenciálním rozdělením dob do poruchy i dob obnovy jednotlivých prvků systému. Předpoklad o exponenciálním rozdělení doby do poruchy a doby obnovy prvků není všeobecně platný. Zejména u doby obnovy zpravidla neplatí. Toto omezení je však nepodstatné z důvodu delších časů do poruchy systému než doby jeho obnovy.

Výhodou aplikací těchto modelů je existence účinného aparátu pro numerický výpočet parametrů spolehlivosti pro různé struktury systému i možnost řešit spolehlivost systémů v celé šíři. Mezi nevýhody patří skutečnost, že s počtem prvků se rychle zvětšuje počet stavů systému i objem výpočetních úkolů. Metoda řeší zbytečně složité spolehlivost i jednoduchých systémů.

7.5. Metody statistického modelování

Další často užívanou metodou při vytváření vícestavových spolehlivostních modelů je metoda statistického modelování (metoda Monte Carlo) [5]. Spolehlivostní model se vytvoří v podobě počítačově realizovaného stochastického algoritmu. Je vyjádřena závislost výstupní náhodné veličiny (doby do poruchy, doby obnovy atd.) na vstupních náhodných veličinách, které vyjadřují spolehlivostní chování prvků a u nichž se předpokládá znalost rozdělení pravděpodobností.

Při vlastních spolehlivostních výpočtech je nutno generovat hodnoty vstupních náhodných veličin pomocí generátoru náhodných čísel. Pro ně se určí hodnota výstupní náhodné veličiny. Opakováním tohoto postupu, při němž se získané hodnoty výstupní náhodné veličiny ukládají do paměti počítače se vytvoří statistický soubor, z něhož se hledají bodové odhady a příslušné konfidenční intervaly spolehlivostních ukazatelů systému. Pro složitější případy je výhodné při programové realizaci stochastického algoritmu využívat simulační programovací jazyky.

Uvedená metoda se hodí pro strukturální analýzu složitých systémů v etapě počátečních fází jejich návrhů. Nevýhodou je nemožnost dosažení výsledku v analytickém tvaru.



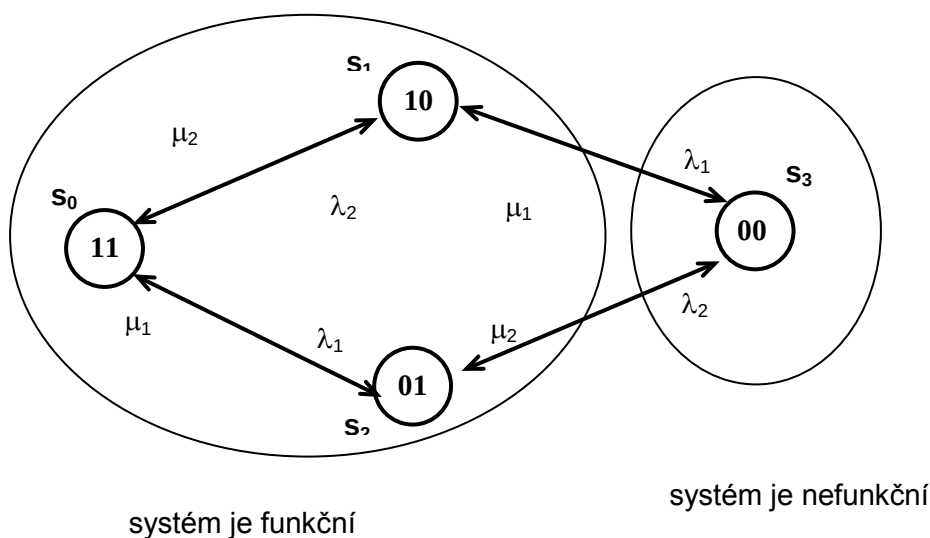
Řešený příklad

Zadání

Paralelní model - systém se dvěma identickými prvky, které se navzájem zálohují. V provozu je vždy jen jeden prvek a druhý se buď obnovuje nebo je v pohotovostním stavu. Při poruše obou prvků stačí k obnovení provozuschopnosti systému obnova jednoho ze dvou prvků. Stejně jako u sériového systému předpokládáme, že porucha nemůže nastat u obou prvků ve stejný časový okamžik.

Řešení:

Diagram přechodů



Řešením je vektorová funkce

$$\mathbf{p}(t) = (p_0(t), p_1(t), p_2(t), p_3(t)),$$

kterou nalezneme jako řešení lineárních diferenciálních rovnic

$$\frac{d\mathbf{p}(t)}{dt} = \mathbf{D}^T \mathbf{p}(t), \quad \sum_{i=1}^n p_i(t) = 1.$$

Z intenzit přechodů

$$d_{01} = \lambda_1$$

$$d_{02} = \lambda_2$$

$$d_{03} = 0$$

$$d_{10} = \mu_1$$

$$d_{12} = 0$$

$$d_{13} = \lambda_2$$

$$d_{20} = \mu_2$$

$$d_{21} = 0$$

$$d_{23} = \lambda_1$$

$$d_{30} = 0$$

$$d_{31} = \mu_2$$

$$d_{32} = \mu_1$$

$$d_{00} = -\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n d_{0j} = -(\lambda_1 + \lambda_2)$$

$$d_{11} = -\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n d_{1j} = -(\lambda_2 + \mu_1)$$

$$d_{22} = -\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n d_{2j} = -(\lambda_1 + \mu_2)$$

$$d_{33} = -\sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n d_{3j} = -(\mu_1 + \mu_2)$$

sestavíme nejprve matici intenzit přechodů a potom transformovanou matici intenzit přechodů

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} d_{00} & d_{01} & d_{02} & d_{03} \\ d_{10} & d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{20} & d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{30} & d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\lambda_1 - \lambda_2 & \lambda_1 & \lambda_2 & 0 \\ \mu_1 & -\lambda_2 - \mu_1 & 0 & \lambda_2 \\ \mu_2 & 0 & -\lambda_1 - \mu_2 & \lambda_1 \\ 0 & \mu_2 & \mu_1 & -\mu_1 - \mu_2 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{D}^T = \begin{pmatrix} -\lambda_1 - \lambda_2 & \mu_1 & \mu_2 & 0 \\ \lambda_1 & -\lambda_2 - \mu_1 & 0 & \mu_2 \\ \lambda_2 & 0 & -\lambda_1 - \mu_2 & \mu_1 \\ 0 & \lambda_2 & \lambda_1 & -\mu_1 - \mu_2 \end{pmatrix}$$

Dosazením do rovnice základní vektorové rovnice pro Markovovy modely dostaneme soustavu lineárních diferenciálních rovnic

$$p_0'(t) = -(\lambda_1 + \lambda_2)p_0(t) + \mu_1 p_1(t) + \mu_2 p_2(t)$$

$$p_1'(t) = \lambda_1 p_0(t) - (\lambda_2 + \mu_1)p_1(t) + \mu_2 p_3(t)$$

$$p_2'(t) = \lambda_2 p_0(t) - (\lambda_1 + \mu_2)p_2(t) + \mu_1 p_3(t)$$

$$p_3'(t) = \lambda_2 p_1(t) + \lambda_1 p_2(t) - (\mu_1 + \mu_2)p_3(t)$$

$$\sum_{i=1}^n p_i(t) = 1$$

Jejíž řešením je opět vektorová funkce vyjadřující pravděpodobnost jednotlivých stavů v zadaném čase.



CD-ROM_8 – CARMS Markovovy modely (ANIMACE_7_D)

Animace ukazuje softwarový systém CARMS firmy Diana (USA) řešící spolehlivostní Markovovy modely.



Shrnutí pojmů

Metoda Markovových modelů, metody statistického modelování.



Otázky

1. Vysvětlete podstatu metody Markovových modelů.
2. Definujte základní předpoklady metody pro užití Markovových modelů.
3. Klasifikujte metodu Markovových modelů.
4. Charakterizujte výsledek metody Markovových modelů,
5. Charakterizujte metody statistického modelování.

8 ZVYŠOVÁNÍ SPOLEHLIVOSTI SYSTÉMŮ

8.1. Pasivní způsoby zvyšování spolehlivosti



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- charakterizovat způsoby zvyšování spolehlivosti systémů se zaměřením na pasivní metody, způsoby zálohování.
- popsat principy hardwarové nadbytečnosti, softwarové spolehlivosti.



Výklad

Zvyšování spolehlivosti je komplexní proces zahrnující všechna technická období života objektu. Co do technického zabezpečení při realizaci systému lze tento proces rozdělit na pasivní zvyšování spolehlivosti a zvyšování spolehlivosti využitím redundance (nadbytečnosti) [1], [5].

Mezi pasivní způsoby patří:

- použití kvalitnějších prvků (od výrobce, třídicí zkoušky),
- zabezpečení vhodné volby pracovního režimu prvků,
- vhodná volba struktur systémů.

Ve všech případech se jedná o použití nejnutnějšího počtu prvků k dané realizaci a pro vyjádření ukazatelů spolehlivosti lze užít sériový spolehlivostní model.

Mezi způsoby využívající nadbytečnost patří hardwarová nadbytečnost, spolehlivost softwarového zabezpečení a informační spolehlivost.

8.2. Hardwarová nadbytečnost - zálohování

Vedle technických prostředků, které jsou nutné pro funkční zabezpečení realizace, jsou užity i prostředky určené pro zvýšení parametrů spolehlivosti. Někdy se toto zálohování nazývá strukturální. Při tom lze rozlišovat tyto druhy zálohování [1], [5]:

- podle rozsahu:
 - celkové zálohování,
 - částečné zálohování,
 - podílové zálohování,

- podle vzájemného vztahu základního a záložního prvku:
 - konfigurační, kdy struktury základního a záložního prvku jsou stejné,
 - funkční, kdy struktury záložního prvku jsou různé, ale jejich funkce je stejná,
- podle způsobu připojení zálohy k systému:
 - stálé (statické), kdy záloha plní funkci spolu se zálohovaným prvkem,
 - substituční (dynamické), kdy záloha začíná plnit funkci zálohovaného prvku po jeho poruše,
- v souvislosti s prováděním obnovy po poruše systému lze rozlišovat:
 - zálohování bez obnovy,
 - zálohování s obnovou.

Uvedené zásady platí jak pro stálé tzv. statické zálohování, tak pro substituční (dynamické) zálohování.

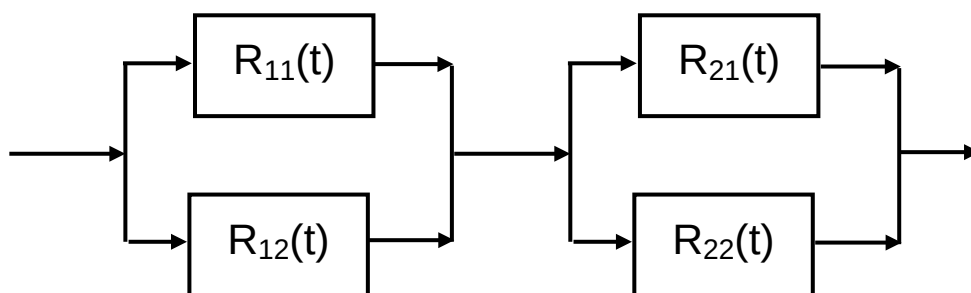
Stálé zálohování je charakterizováno situací, kdy záložní prvky jsou trvale zapojeny spolu se základním prvkem a to i tehdy, dojde-li k poruše. Vždy je proto nutné analyzovat následky poruch prvků. Toto zálohování se používá na co nejnižší úrovni rozkladu struktury systému.

U substitučního zálohování je při vzniku poruchy porouchaný základní prvek odpojený a na jeho místo je připojený záložní prvek. Dochází tak ke změně struktury systému. Je zde kladen důraz na konkrétní určení základního prvku, neboť ten je zpočátku v činnosti. Obsahuje-li struktura substitučního zálohování více záložních prvků, stanovuje se pořadí, ve kterém budou zařazeny v činnosti. Systém je nutné vybavit přepínačem, který indikuje výskyt poruchy provozovaného prvku a přepíná činnost na určený záložní prvek.

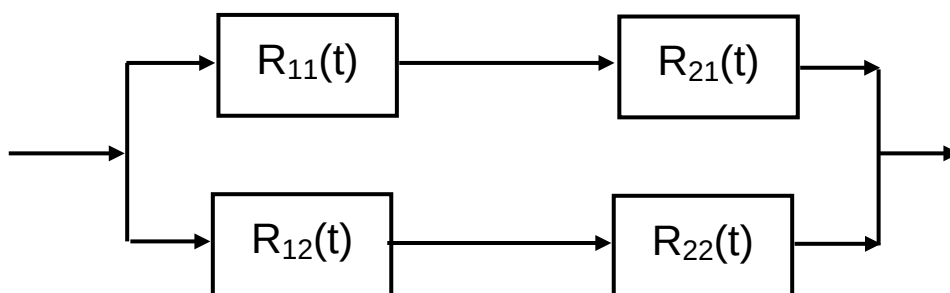
Na takový přepínač jsou kladeny požadavky:

- musí dostatečně rychle indikovat výskyt poruchy a v krátké době zabezpečit přepnutí,
- musí vykazovat zanedbatelnou pravděpodobnost výskytu poruchy v porovnání s funkčním a záložním prvkem.

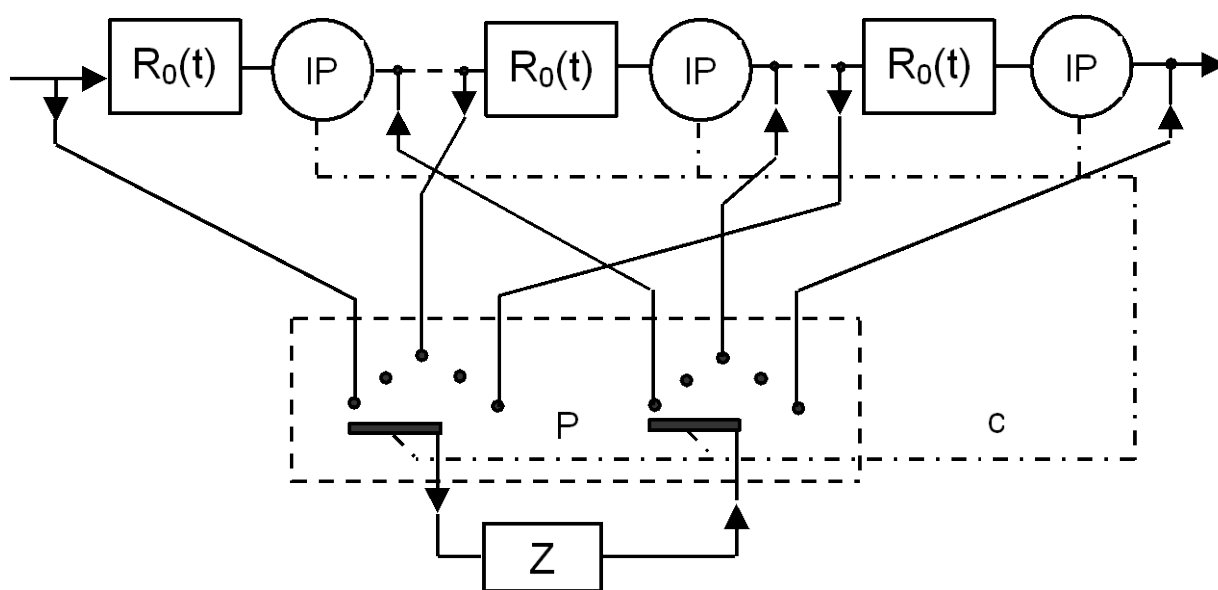
Při zavedení předpokladu bezporuchovosti přepínacího prvku vede substituční zálohování vždy ke zvýšení bezporuchovosti, přičemž nezatížené zálohování je vždy výhodnější než zatížené. V praxi je však nutno zvážit i další okolnosti jako je např. delší časový interval pro provedení detekce poruch, které je u nezatíženého zálohování delší než u zálohování zatíženého.



Obr. 23 Spolehlivostní blokové schéma zálohování po skupinách



Obr. 24 Spolehlivostní blokové schéma zálohování v paralelně sériovém zapojení



Obr. 25 Podílové substituční zálohování

8.3. Problémy softwarové spolehlivosti

U kybernetických systémů je spolehlivost dána i spolehlivostí algoritmické struktury a její programové realizace, tj. softwarovou spolehlivostí a spolehlivostí přenosu, zpracovávání a uchování informace, tj. informační spolehlivostí, případně při přítomnosti obsluhy i spolehlivostí lidského činitele.

Cílem technického vývoje je zde návrh systému odolného proti poruchám (fault tolerant system). Jedná se o schopnost provádět předepsaný algoritmus bez ohledu na poruchy technických prostředků a chyby v programové realizaci. Snahou zde je nejen předcházet poruchám, ale předcházet i následkům poruch. Je třeba vždy specifikovat, vůči jakým poruchám má být systém odolný. Zpravidla je třeba učinit systém odolný vůči kritickým poruchám. Jedná se o koncepci bezpečnosti při poruše (fail-safe) a o koncepci bezpečného života (life-safe), tj. aby pravděpodobnost kritické poruchy byla až do ukončení technického života systému malá. Obecně je třeba vyvinout snahu, aby program nebyl změněn ani zastaven poruchami, aby výsledky neobsahovaly chyby způsobené poruchami, aby doba výpočtu nepřekročila stanovenou mez.

Při návrhu spolehlivostních algoritmů se uplatňují hlediska odolnosti vůči poruchám již při formulaci požadavků, dále pak v etapě návrhu algoritmické struktury a algoritmů. V této etapě činnosti se dbá na funkční správnost, zpravidla dekompozicí úlohy, čímž se dosáhne poměrné samostatnosti jednotlivých částí celku, využívání co nejjednodušších struktur. Odolnosti proti poruchám se dosáhne opět redundancí a sice algoritmickou, programovou a informační, kdy dochází k zopakování výpočtu, detekci, případně opravě chyb. K tomu se využívá kontrolních bodů, ve kterých lze úlohu kontrolovat. Důležitá je proto testovatelnost a snadnost údržby, které souvisí opět s rozčleněním úlohy. Žádoucí je rozčlenění do stadia modulů, kdy modul realizuje jedinou funkci. Modul je pak kompaktní, má jednoduché rozhraní na úrovni pouhého předávání dat.

Důležitou etapou je pak vlastní tvorba programů. V této oblasti se techniky rychle vyvíjejí. V současné době se užívá např. strukturované programování, které lze popsat v krocích: určení datových struktur - odvození struktury programu z datových struktur - vytvoření seznamu podmínek a operací úlohy - přiřazení podmínek a operací do programové struktury - zápis programové struktury - zápis programu v programovacím jazyce.

Poslední etapou je pak ověřování správnosti programů, které se děje hlavně testováním.

Pro vyjádření kvantitativních ukazatelů spolehlivosti programového vybavení se pak užívá obdoba ukazatelů bezporuchovosti technických prostředků.

Významným činitelem spolehlivosti je i lidský činitel. Jedná se o složitou problematiku. V zásadě je nutno sladit psychomotorickou kapacitu pracovníka s požadavky na provoz technického systému. S ohledem na individuální vlastnosti člověka je třeba provádět selektivní výběr, kvalifikační přípravu, stanovit soubor závazných norem chování. Koncepci systému je však vhodné volit tak, aby lidský faktor byl nikoliv sériovým prvkem ve spolehlivostním schématu, ale prvkem záložním.



Shrnutí pojmů

Způsoby zvyšování spolehlivosti systémů se zaměřením na pasivní metody, způsoby zálohování, popsat principy hardwarové nadbytečnosti, softwarové spolehlivosti.



Otázky

1. Charakterizovat způsoby zvyšování spolehlivosti systémů se zaměřením na pasivní metody
2. Vyjmenujte způsoby zálohování systému.
3. Popište principy hardwarové nadbytečnosti a softwarové spolehlivosti.

9 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat diagnostické úlohy a metody,
- popsat stimulační a funkcionální diagnostiku, expertní systémy pro diagnostiku.



Výklad

Postupně se vyvinul nový obor - technická diagnostika [9]. Diagnostika je věda o zjišťování poruch, resp. celkového technického stavu zařízení. Pro praxi má největší význam tzv. bezdemontážní diagnostika. Rozlišujeme tři typy úloh:

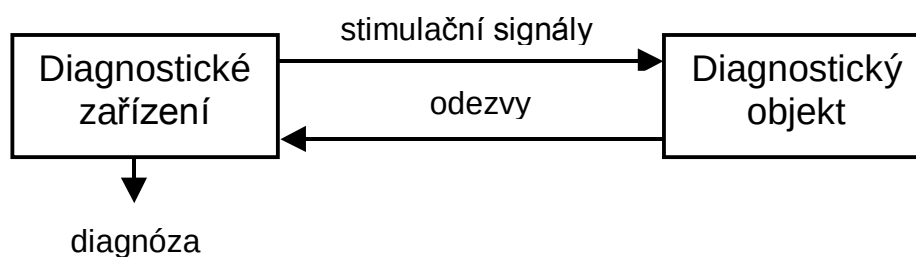
- vlastní technickou diagnostiku (vyšetřuje stav zařízení v přítomnosti),
- technickou prognostiku - zahrnuje úlohy předvídání technického stavu,
- technickou genetiku - určování stavu v jakém se objekt nacházel v minulosti.

V rámci technické diagnostiky jsou jako vědní discipliny řešeny:

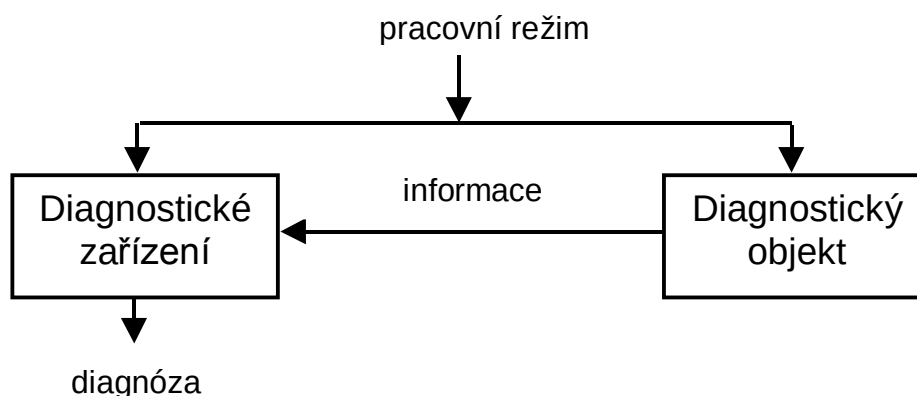
- analýza konkrétních objektů tj. určení jeho technických stavů,
- sestavení matematických modelů s cílem vyvinout diagnostické testy pro vyhledávání poruch a sestavení optimálních diagnostických programů,
- vývoj diagnostických zařízení, principy jejich projektování, hodnocení efektivnosti.

Diagnostika se vyvíjí ve výrobě i u uživatele. Úkolem diagnostiky ve výrobě je dosahovat a ověřovat kvalitu produkce. V té souvislosti hovoříme o mezioperační diagnostice, diagnostice po konečné montáži, při oživování atd. U uživatele slouží diagnostika k ověření, zda výrobek plní požadované parametry, k detekci a lokalizaci poruch. Hovoříme pak o servisní diagnostice, průběžné diagnostice pro realizaci zálohování apod.

Požadavky a úlohy diagnostiky musí být formulovány a řešeny v období návrhu systému. Hovoříme o zabezpečení diagnostikovatelnosti systému. Samotné diagnostické zařízení, tj. soubor technických hardwarových i softwarových prostředků lze realizovat samostatně nebo může být řešeno jako součást diagnostikovaného systému. Hovoříme pak o vnější a vnitřní diagnostice. Mnohdy dochází ke kombinaci obou způsobů.



Obr. 26 Stimulační diagnostika



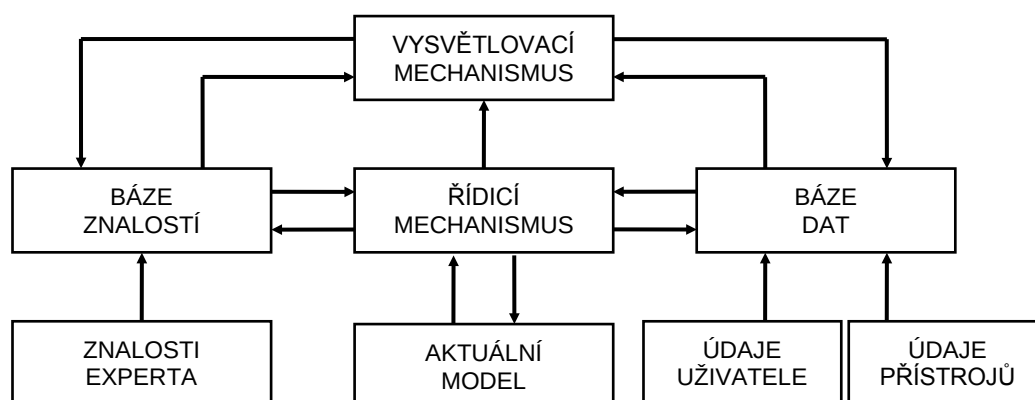
Obr. 27 Funkcionální diagnostika

V případě rozsáhlých systémů a zejména v případech, kdy se diagnostický systém vyvíjí dodatečně, se uplatňují expertní diagnostické systémy.

Expertní systém je počítačový program pro řešení složitých úloh, v němž jsou simulovány činnosti experta - specialisty. Cílem je dosáhnout ve zvolené problémové oblasti kvality rozhodování na úrovni experta. Expertní systém obsahuje bázi znalostí, která je realizována programovanými moduly a bází dat, která je představována informacemi od uživatele a měřenými daty procesu. Řídící strategie jejich využívání je zabezpečována modulem řídicího mechanismu. Po zaplnění báze znalostí vzniká problémově orientovaný expertní systém, který umožňuje interpretovat reálná data daného případu.

Řídící odvozovací mechanismus s využíváním báze dat a báze znalostí upřesňuje současný model daného případu. Z počátku je tento model tvořen na základě apriorních předpokladů z báze znalosti a postupně je konkretizován podle aktuálních dat.

Aplikace expertního systému je vhodná tam, kde řešená oblast je dostatečně úzká a kde neexistují rozporné údaje o řešené oblasti. Dále musí být splněna podmínka dostatečných znalostí o problému i možnosti členění problematiky na relativně samostatné celky.



Obr. 28 Obecné schéma diagnostického expertního systému



CD-ROM _9 – Expertní systém (ANIMACE_9_A)

Animace ukazuje prostředí expertního systému a ukazuje princip tvorby báze znalostí na jednoduchém praktickém příkladu.



Shrnutí pojmů

Diagnostické úlohy a metody, stimulační a funkcionální diagnostika, expertní systémy pro diagnostiku.



Otázky

1. Vysvětlete pojmy vlastní technická diagnostiku, technická prognostika, technická genetika-
2. Vysvětlete pojmy stimulační a funkcionální diagnostiku.
3. Definujte blokové schéma struktury expertního systému.

10 UDRŽOVATELNOST A ZABEZPEČENÍ ÚDRŽBY

10.1. Údržba



Čas ke studiu: 2,5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat základní předpoklady klasické údržby, způsoby údržby,
- popsat udržitelnost a její přístupy,
- charakterizovat metodu TPM.



Výklad

Důležitý vliv má diagnostika na proces údržby. Zde můžeme rozlišovat klasický a progresivní způsob údržby. Klasický způsob údržby vychází z předpokladů:

- systém preventivních prohlídek umožní zjišťovat a odstraňovat stav zjištěných nedostatků,
- všechna zařízení mají vlastnosti odpovídající postupnému opotřebení, a proto jsou používány jednotné postupy ke stanovení intervalů prohlídek.

Progresivní způsob údržby vychází z poznání skutečných vlastností, technický stav zařízení je kontrolován plynule a zásahy se provádějí jen tehdy a tam, kde je to účinné. Často se oba způsoby údržby vzájemně kombinují [9].

Program údržby pak obsahuje jeden nebo více následujících způsobů údržby :

- pevné časové lhůty (Hard Time Limit) - HT,
stanovení časového intervalu pro vykonání údržbářských činností,
- podle stavu (On Condition) - OC,
provádějí se opakované prohlídky nebo zkoušky, jež mají určit stav zařízení,
- sledování stavu (Condition Monitoring) - CM,
je prováděno sledování stavu a průběžně je řešena problematika odstraňování poruch.

S ohledem na definici udržitelnosti je zřejmé, že ta je dána technologií konstrukce objektu, ale také celou řadou provozních opatření na straně zabezpečení systému údržby, jejího personálního i technického vybavení, úrovně technické dokumentace, úrovně zásobování atd. Řešení některých z těchto problémů je součástí technické logistiky.

Metoda řešení této problematiky je zpracována v obsáhlé normě ČSN IEC 706 Pokyny k udržitelnosti zařízení, která se skládá z těchto devíti částí:

- úvod do udržitelnosti,
- požadavky na udržitelnost ve specifikacích a smlouvách,
- program udržitelnosti,
- diagnostické zkoušení,
- studie udržitelnosti v etapě návrhu,
- ověřování udržitelnosti,
- sběr, analýza a prezentace údajů vztahujících se k udržitelnosti,
- plánování údržby a jejího zajištění,
- statistické postupy v udržitelnosti.

Tato norma dovoluje náhled na údržbu jako na subsystém jakosti. V rámci systému jakosti má pak proces údržby svůj specifický charakter poznamenaný tím, že jeho proměnné jsou stochastické veličiny.

Pro účely řízení údržby je stěžejní částí vytvoření programu preventivní údržby. Ten obsahuje celkový popis zařízení, jeho členění do podskupin, technická opatření pro sledování odpracované doby podskupiny a prvků, popis technické diagnostiky, revizních prohlídek, logistického zabezpečení náhradních dílů, přípravků atd.

10.2. Komplexní produktivní údržba

Při definování poslání údržby je velmi často opomíjena důležitá okolnost a tou je požadavek změny kultury prostředí [14]. Nejedná se jen o změnu kultury v procesu údržby, ale v celém podniku a údržba je právě tou silou, která k této změně může rozhodujícím způsobem přispět. Metoda údržby, která rozhodujícím způsobem mění kulturu v podniku je uplatňování komplexní produktivní údržby.

V roce 1971 zformulovali pracovníci Japonského institutu provozních inženýrů (JIPE) definici komplexní produktivní údržby TPM (Total Productive Maintenance) a zásad, podle kterých se metoda může úspěšně aplikovat. V této definici se uvádí, že TPM [15]:

- směřuje k maximalizaci efektivnosti provozu zařízení,
- vytváří komplexní systém preventivní údržby v celém období životnosti zařízení,
- zahrnuje všechny fáze činnosti – plánování, provoz, údržbu,

- vyžaduje účast pracovníků všech hierarchických stupňů podnikové struktury od vrcholového řízení po provozní dělníky,
- prosazuje komplexní produktivní údržbu na základě motivačního řízení činnosti malých pracovních skupin.

Totální produktivní údržba přináší ve srovnání s ostatními druhy údržby novou filozofii v tom smyslu, že vlastní zabezpečování údržby se provádí prostřednictvím malých skupin pracovníků, ve kterých důležitou roli hraje vlastní obsluha zařízení. Přestává ostře odlišování operátorů výrobního zařízení od pracovníků údržby.

Pozornost TPM je zaměřena nejen na vyčíslitelné účinky údržby, ale také na nevyčíslitelné účinky. Mezi nevyčíslitelné účinky patří: systematickost, pořádek, dokonalost, bezproblémovost a disciplína.

I tyto účinky lze specifikovat:

- příprava pracovišť:
jedná se o dodržování mazacích plánů, specifikace jednotlivých uzlů, které budou předmětem zavádění autonomní údržby a odstranění jejich funkčních nedostatků,
- realizace opatření k vyloučení zdrojů poruch:
preventivní eliminace zdrojů poruch a znečištění, konstrukční úpravy míst špatně přístupných pro mazání a čištění, zkracování časů pro mazání a čištění,
- vypracování předpisů pro čištění a mazání:
vypracování technologických předpisů pro čištění, mazání a seřizování jednotlivých uzlů včetně časového harmonogramu,
- zaškolení pracovníků na úseku inspekce:
zaškolování je prováděno na úseku inspekce zařízení s využitím příslušných předpisů a na úseku odstraňování závad zařízení ve vazbě na výsledky inspekce,
- provádění autonomní inspekce:
na základě plánu prohlídek je uskutečněno jejich provádění,
- zajištění systemizace řízení:
vytvoření uceleného systému řízení údržby a jeho standardizace, vytvoření předpisů pro udržování pořádku, pro inspekční prohlídky a mazání, předpisů pro manipulaci na pracovištích, předpisů pro standardizaci evidence, řízení hospodaření s nástroji a přípravky,

- perspektivní autonomní řízení:
vypracování ucelené strategie, cílů a realizace racionalizačních opatření, trvalá evidence výskytu vad, jejich rozbor a návrhy na zlepšení.

Mezi vyčíslitelné přínosy patří zmenšení ztrátových časů z fondu celkového času chodu zařízení, čistého času chodu zařízení a dále zvýšení zhodnocení čistého chodu zařízení snížením vad výrobků. Autoři metody to označují jako snížení šesti hlavních ztrát:

- poruchy zařízení – ztrátové časy způsobené nepředvídanými poruchami,
- nastavování a seřizování – ztráty času v důsledku časové náročnosti nastavování a seřizování zařízení
- prostoje a odstávky – ztráty vyplývající z prostojů a odstávek způsobených vlivem poruch čidel a dopravních zařízení,
- snížení rychlosti – ztráty způsobené diferencí mezi předpokládanou a skutečnou rychlostí průběhu výrobního procesu,
- vady během procesu – ztráty způsobené vznikem vad a jejich opravami,
- snížení výkonu – ztráty, které vznikají v průběhu náběhu po poruchách.

Podstatné je, že tyto hlavní ztráty se dají kvantifikovat a dá se tak vyhodnocovat celková efektivnost zařízení. Právě průběžné měření efektivnosti zařízení a úrovně šesti hlavních ztrát je podstatnou vlastností TPM. Cílem metody je snížení ekonomických nákladů na provoz zařízení po celou dobu jeho životnosti (LCC - Life Cycle Cost).

Uvádí se, že celková efektivnost se uplatněním TPM zvyšuje až o 50 %, což vede ke zvýšení produktivity práce o obdobnou hodnotu. Zmenšením časových ztrát snížením poruchovosti a odstraněním příčin nižší rychlosti procesu znamená zmenšení nároků na počet pracovníků a tím snížení mzdových nákladů. Vyloučení vad v procesu znamená zlepšení kvality výrobků a zmenšení ztrát opravami vad. Tato skutečnost má vliv i na energetickou náročnost výroby.

Důležitým přínosem je zlepšení celkové kultury pracoviště. To má vliv na zlepšení podmínek prodeje a vytvoření příjemnějšího pracovního prostředí. Mění se vztah všech pracovníků k výrobnímu procesu včetně údržby. Mizí rozdíly mezi pracovníky údržby a operátory výrobních zařízení. Dochází ke všeobecnému zvyšování kvalifikace a k preferenci kvalifikovaných pracovníků. Zkvalitňování prostředí a pracovníků má rovněž svůj ekonomický rozměr, který se však dá jen obtížně vyčíslit.

Pro úspěšné zavádění TPM se navrhuje následující postup:

Přípravné stadium:

- Oznámení rozhodnutí vrcholového vedení zavést metodu TPM, zpravidla oznámením na veřejném shromáždění a v závodním časopise.
- Výchova pracovníků a propagace metody TPM organizací kvalifikačních kurzů pro vybrané pracovníky všech úrovní, využití informačních a propagačních materiálů pro potřeby všech ostatních pracovníků.
- Organizační zajištění realizace zavedení metody TPM zřízením zvláštních řídicích skupin a specializovaných pracovních skupin.
- Formulování základních cílů a forem uplatňování metody TPM, hodnotové vyjádření cílů a odborný odhad efektivnosti.
- Vytvoření řídicího programu zavádění metody TPM, a to od prvních přípravných prací až po vyhodnocení výsledků.

Úvodní stadium:

- Zahájení realizace zavádění metody TPM v provozu, a to za přítomnosti zákazníků, zástupců sdružených a spolupracujících firem.

Realizační stadium:

- Zlepšení efektivnosti jednotlivých výrobních uzlů, prostřednictvím jejich specifikace a vytvořením řešitelských týmů.
- Vytvoření systému autonomní údržby metodou postupných kroků, vyhodnocení a zpracování osvědčení o výsledcích.
- Vypracování systému plánovaných oprav v oddělení údržby, především periodických a prediktivních oprav, řízení plánu oprav, zajišťování náhradních dílů a nástrojů.
- Zaškolení obsluhy v oblasti údržby a provozu v nových podmínkách, kolektivní výuka vedoucích pracovníků, zaškolení dělníků.
- Vytvoření systému pro řízení provozu zařízení v nových podmínkách, návrh systému prevence, řízení provozu a sledování efektivnosti provozu.

Trvalý provoz:

- Dokonalé zvládnutí a dosažení vysoké úrovně aplikace metody TPM a vytyčení vyšších cílů.



CD-ROM _10 – TPM (ANIMACE_10_A)

V rámci animace je možné si vyzkoušet stanovování ukazatelů vztahujících se k problematice TPM.



Shrnutí pojmů

Základní předpoklady klasické údržby, způsoby údržby, popsat udržovatelnost a její přístupy, metoda TPM.



Otázky

1. Definovat základní předpoklady klasické údržby.
2. Definujte základní způsoby údržby,
3. Definujte udržovatelnost a její přístupy.
4. Charakterizujte metodu TPM a její jednotlivá stádia.



Literatura

- [1] MYKISKA, A. *Spolehlivost technických zařízení*. Praha : Česká společnost pro jakost, 1991
- [2] BENEŠ, J. *Statistická dynamika regulačních obvodů*. Praha : SNTL, 1961
- [3] Kolektiv autorů. *Stati o jakosti. Automatizace*, 1992, příloha časopisu
- [4] CALABRO, S. R. *Základy spolehlivosti a jejich využití v praxi*. Praha : SNTL, 1965, přel. z Reliability Principles and Practices, McGraw-Hill Book Company, Inc. 1962
- [5] BEDNAŘÍK, J. aj. *Technika spolehlivosti v elektronické praxi*. Praha : SNTL, 1990
- [6] UŠAKOV, I. A. *Příručka spolehlivosti v radiotechnice a automatizační technice*. Praha : SNTL, přel. z Spravočnik po rasčotu naděžnosti techničeskych sistem. Moskva : Radio i svjaz, 1985
- [7] HAJKR, O. aj. *Teorie statistiky*. Ostrava : VŠB, 1988
- [8] ŠKVARKA, P. *Spoločnosť v jadrovej energetike*. Bratislava : ALFA, 1989
- [9] JANOUŠEK, I. aj. *Technická diagnostika* Praha : SNTL, 1988
- [10] MAIXNER, L., KOLNIKOVÁ, Z. *Spolehlivost automatických výrobních systémů*. Praha : SNTL, 1984
- [11] VORLÍČEK, Z. *Spolehlivost a diagnostika výrobních strojů*, Praha : Ediční středisko ČVUT, 1991
- [12] HLAVIČKA, J. *Spolehlivost a diagnostika*. Praha : Ediční středisko ČVUT, 1989
- [13] JURČA, V., LEGÁT, V. *Jakost, spolehlivost a obnova strojů*. Skripta, Praha, 2006
- [14] VROŽINA, M. *Řízení spolehlivosti ve vztahu k údržbě technologických zařízení*. Ostrava : VŠB-TU, 1999
- [15] *Total Productive Maintenance*, Plant Engineering , p.199-123, (překlad NH Ostrava), 1986