

**TECHNICKÁ UNIVERZITA  
V LIBERCI**

**Fakulta mechatroniky, informatiky  
a mezioborových studií**

**AUTOREFERÁT K DISERTAČNÍ PRÁCI**

**MODELOVÁNÍ DYNAMICKÉ SPOLEHLIVOSTI  
UŽITÍM MARKOVSKÉ ANALÝZY**

Ing. Josef Chudoba



**Disertační práce:** Modelování dynamické spolehlivosti užitím markovské analýzy

Autor: Josef Chudoba ([josef.chudoba@tul.cz](mailto:josef.chudoba@tul.cz))  
Školitel: Pavel Fuchs ([pavel.fuchs@tul.cz](mailto:pavel.fuchs@tul.cz))  
Školitel specialista: David Vališ ([david.valis@tul.cz](mailto:david.valis@tul.cz))

Studijní program: P3901 Aplikované vědy v inženýrství  
Studijní obor: 3901V025 Přírodovědné inženýrství

Adresa pracoviště: Technická univerzita v Liberci  
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií  
Studentská 2  
461 17 Liberec

© Josef Chudoba, 2009



## Anotace

Disertační práce na téma Modelování dynamické spolehlivosti užitím markovské analýzy má za hlavní cíl rozšířit markovskou analýzu ve spolehlivosti o prostředek, který umožňuje zjistit a popsat časovou a výkonovou dynamiku složitých systémů především se síťovou strukturou. Základním předpokladem markovské analýzy jsou konstantní intenzity poruch a oprav mezi stavy.

V práci je uveden prostředek na časovou dynamiku, který umožňuje řešit úlohy s nekonstantní intenzitou poruch a oprav mezi stavy. Dále je schopen řešit modely systémů s preventivní údržbou. Matematickým základem řešení je sestavení obyčejných diferenciálních rovnic s nekonstantními parametry a následné řešení metodou Runge-Kutta pro komponenty, které jsou stejně spolehlivé jako staré. Nebo pro komponenty systému, které jsou stejně spolehlivé jako nové, řešit úlohu pomocí metody Monte Carlo.

Výkonovou dynamiku lze popsat u systémů s násobným počtem shodných jednotek, u kterých je výsledná spolehlivost závislá na objemu výroby, kombinací jednotek v provozu a typu zálohování (aktivní nebo pasivní).

Poznatky z této disertační práce lze použít například při modelování spolehlivosti elektrické, silniční a železniční sítě. Pro aplikační řešení projektu bylo použito modelování kompresorové stanice a přilehlých linií tranzitního plynovodu RWE Transgas. Vypočítáním okamžité nepohotovosti systému se zjišťuje pravděpodobnost, že daná síť nebude schopna uspokojit požadavky zákazníka. To znamená u plynárenské společnosti nedodání plynu v odpovídající kvalitě nebo u ostatních uvedených příkladů např. přetížení sítě. Tuto problematiku dosud neřeší dostupné softwarové nástroje používané ve spolehlivosti.

Tato práce by měla výrazně přispět k efektivnímu stanovení pravděpodobnosti vzniku kritických a nežádoucích výpadků při modelování složitých systémů. Vyhodnocením a porovnáním výsledků několika scénářů modelů spolehlivosti se umožní snížit pravděpodobnost vzniku havarijních situací, například účinnější údržbou systému nebo početnějším zálohováním komponent. Účinným snížením pravděpodobnosti vzniku havarijní situace se následně ušetří finanční náklady plynoucí z frekvence výpadku a celkové doby při nedodávání plynu.

## Klíčová slova:

Dynamická spolehlivost, markovská analýza, výkonová analýza, údržba, Weibullovo rozdělení, kompresorová stanice, RWE Transgas



## Abstract

This dissertation thesis on the topic of „Modelling of dynamical dependability by using stochastic processes“ has the main aim of expanding the Markov analysis (in dependability) by adding an instrument, which allows learning and describing time and performance dynamics of complicated systems, especially network structure. The base hypothesis of the Markov analysis is that failure and repair rates between two postures are constant.

The instrument for time dynamics can solve tasks whose failure and repair rates are not constant and also solve repairs in predetermined maintenance. Mathematical solving of this problem is based on a construction of differential equations with non-constant parameters and their solution. The Runge-Kutta method is used for components, which are as „good as old“. The Monte Carlo method is usually used for components of a system, which are as “good as new”.

Performance dynamics can be described as systems with multiple counts of the same items. Resultant dependability of these items depends on the production volume and the combination of items, which are in use, or in active and passive redundancy.

An example can be mentioned as modelling of dependability of an electrical network and systems for railways and roads. Practical solving of this project was shown on the modelling of a compressor station and adjacent lines of the gas pipeline RWE Transgas. After instantaneous unavailability, a solution is possible to determine the probability that this gas pipeline system is not able to provide gas distribution to customers in required amounts. This could mean that the provider can't provide gas distribution in the required qualities or another example can be that gas pipeline becomes overloaded etc. Conventional software engines in dependability didn't solve these problems at that time. This dissertation thesis may help on a large scale by an efficient evaluation of probability of the creation on catastrophic failures by the modelling of complicated systems.

Thanks to the revaluation of modelled causes of dependability it is possible to decrease the probability of cataleptic failure. This can be achieved, for example, by more efficient maintenance, or multiple component redundancy. If the probability of cataleptic failure is effectively decreased, it would bring a reduction of cost resulting from the frequency of gas distribution failure and also the total time of failure.

## Key words:

Dynamic reliability, Markov analysis, performance analysis, maintenance, Weibull distribution, compressor station, RWE Transgas



## Obsah:

<b>Anotace</b> .....	<b>2</b>
<b>1. Úvod</b> .....	<b>6</b>
<b>2. Cíle disertační práce</b> .....	<b>7</b>
<b>3. Teoretické poznatky</b> .....	<b>9</b>
3.1 Základní metody spolehlivosti vhodné k zjištění pohotovosti .....	9
3.2 Markovská analýza ve spolehlivosti.....	9
3.3 Statistická rozdělení popisující dobu do poruchy komponenty .....	10
<b>4. Markovská analýza a neexponenciální rozdělení doby do přechodu</b> .....	<b>12</b>
<b>5. Modelování údržbových zásahů</b> .....	<b>15</b>
<b>6. Výkonové konfigurace systému</b> .....	<b>17</b>
<b>7. Závěr</b> .....	<b>20</b>
<b>8. Literatura</b> .....	<b>23</b>



## 1. Úvod

Firmy, které vyrábějí nebo chtějí vyrábět nové technologické celky, musí podle platné legislativy zajistit, aby jejich výrobky byly bezpečné. V rámci udržení si dobrého jména na trhu a také z důvodů ekonomických musí zajistit, aby jejich výrobky splňovaly určité předem dané parametry spolehlivosti a tím pádem i pohotovosti, bezporuchovosti, udržovatelnosti a zajištěnosti údržby.

V poslední době lze sledovat trend, při kterém je zřejmý stále se zvyšující zájem o vytváření složitějších modelů spolehlivosti. Zatímco dříve se používal pro popis funkce systému obvykle dvoustavový model, dnes se již často pracuje s modely vícestavovými. Dříve se pravděpodobnost vzniku poruchy komponenty do času  $t$  popisovala pomocí exponenciálního rozdělení -  $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ , při kterém se předpokládá, že komponenta s dobou používání nedegraduje. Dnes se již využívá při popisu pravděpodobnosti vzniku poruchy komponenty do času  $t$  i jiných rozdělení. Velmi často například Weibullovo

rozdělení -  $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$ , pomocí kterého lze popsat degradaci komponenty v čase. Nadto je vhodné uvést, že technologické systémy mají stále sofistikovanější politiku údržby. Při sjednávání obchodních kontraktů je již zcela běžné, že jsou ve smlouvách uváděny i parametry týkající se spolehlivosti systémů.

Jak již bylo výše naznačeno, je nutné stále prohlubovat základní metody spolehlivosti tak, aby byly schopny popsat (z pohledu spolehlivosti, bezpečnosti, ekonomiky a také spokojenosti odběratele a dodavatele) stále složitější systémy.

V názvu disertačního tématu je uveden termín „dynamická spolehlivost“. Tento termín je v poslední době hojně využíván a je často chápán ve více významech. Zatím neexistuje ustálená definice tohoto termínu. V [1] na straně 147 je uvedena následující definice: „Dynamická spolehlivost zahrnuje studium stochastických procesů, které popisují dynamiku systému, kdy důraz je kladen zejména na poruchy charakterizované vystoupením nějaké procesní proměnné z bezpečné domény“.

Lze popsat více typů dynamických úloh, které jsou ve světě řešeny. Termín dynamická spolehlivost se objevuje často například v následujících úlohách:

- Parametry spolehlivosti jsou závislé nejenom na době provozu, ale navíc na dalších fyzikálních veličinách, které se sledují a nabývají spojitých hodnot v určitém intervalu a navíc je lze pouze obtížně zdiskrétit.
- Doba do poruchy komponenty je popsána pomocí speciálních rozdělení. Dynamická spolehlivost se v tomto případě zabývá použitelností nových modelů a zjištěním optimálních parametrů speciálních rozdělení.
- Řešení spolehlivosti systémů pomocí metody sítí.
- Systém se popisuje pomocí více než dvou stavů, kde doba do poruchy není popsána pomocí exponenciálního rozdělení. Odlišuje se od druhého bodu tím, že se předpokládá nutnost popsat systém více než dvěma stavy.
- Zjišťování spolehlivosti systému v závislosti na jeho výkonnosti.

V rámci disertační práce se autor bude zabývat posledními dvěma body z výše uvedeného seznamu.



## 2. Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je vytvořit model spolehlivosti, který umožní rozšířit modelování pohotovosti vícestavových systémů, u kterých se nepředpokládá asymptotická (ustálená) pohotovost  $A$ . Matematickým základem pro výpočet funkce okamžité pohotovosti  $A(t)$  (nepohotovosti  $U(t)$ ) vícestavových systémů je v této práci teorie stochastických procesů. Spolehlivostním základem je metoda markovské analýzy. Vytvořený model umožní (na základě znalosti topologie přechodového diagramu) rozšířit stávající vícestavový markovský model o popis doby do poruchy komponent pomocí neexponenciálního rozdělení (se zaměřením především na Weibullovo) - kapitola 4 disertační práce a dále o popis preventivní údržby - kapitola 5 disertační práce. Tím bude možné stanovit, na základě vstupních dat, hodnotu funkce okamžité pohotovosti  $A(t)$  systému v čase. Obě kapitoly jsou časově dynamickou složkou pohotovosti systému.

V současné době je Weibullovo rozdělení obvykle využíváno pro popis doby do poruchy dvoustavových systémů a zřídka vícestavových systémů. Tím, že intenzity přechodů mezi stavy nejsou u Weibullova rozdělení konstantní, nelze úlohu řešit pomocí markovských homogenních procesů. Za předpokladu, že jsou komponenty po obnově stejně spolehlivé jako staré (as good as old), se úloha řeší pomocí soustavy diferenciálních rovnic s nekonstantními parametry. V druhém případě, kdy komponenty mají po obnově vlastnost, že jsou stejně spolehlivé jako nové (as good as new), je nutné využít metod řešení pomocí stochastických procesů - například metody Monte Carlo. Oba dva přístupy jsou natolik odlišné, že první řešící úlohu pomocí soustavy diferenciálních rovnic je uveden v kapitole 4.2 disertační práce, druhý pomocí metody Monte Carlo je uveden v kapitole 4.3.

Kapitola 5 se zabývá modelováním systémů s preventivní údržbou. Obnova komponenty po poruše se v přechodovém diagramu modeluje pomocí přechodu ze stavu  $i$  do stavu  $j$ . Přechod je ohodnocen intenzitou opravy  $h_{ij}(t)$ . Na systémech se však velice často provádí preventivní údržba, kdy se komponenty v definovaném čase vymění, nebo se zkontroluje jejich provozuschopnost. Tímto typem údržby přejde v předem daném čase  $t$  model systému s určitou stanovenou pravděpodobností ze stavu  $i$  do stavu  $j$ . Tento typ údržby způsobí nespojitost funkce okamžité pohotovosti  $A(t)$  systému. Na systém po preventivní údržbě lze pohlížet jako na nový systém s jinými pravděpodobnostmi jednotlivých stavů, ale se shodnou topologií modelu přechodového diagramu. Pro popis preventivní údržby je zavedena matice údržby  $U(t_1, t_2)$  ( $t_1 < t_2$ ), která stanovuje pravděpodobnosti přechodů mezi jednotlivými stavy v časovém intervalu  $< t_1, t_2 >$ . K matematickému řešení úloh bude využito markovských řetězců.

Další řešenou problematikou je modelování výkonových konfigurací systému - kapitola 6. Výkonovou dynamiku lze sledovat u systémů, kde se připojují resp. odpojují subsystémy nebo pracují na nižší výkon na základě okamžitého množství objemu výroby. Pro tyto systémy je možné sestavit větší množství modelů spolehlivosti, které jsou závislé na požadovaném objemu výkonu. Pro každý výkonový scénář se vytvoří přechodový diagram, který se nemusí odlišovat v topologii od ostatních, ale který se odlišuje především v intenzitách přechodů mezi stavy a v definici, zda je daný stav provozní, částečně poruchový, nebo poruchový. Celková pohotovost systému je potom funkcí objemu výroby a způsobem zálohování jednotlivých subsystémů.

Dalším rozšířením modelu bude další aplikace, která umožní zjistit způsobilost systému - kapitola 7.1 disertační práce. Dále model umožní ohodnotit stavy a přechody mezi



stavy (porucha, obnova nebo údržba komponenty) ziskem nebo ztrátou - kapitola 7.2. Tím lze, krom funkce okamžité pohotovosti  $A(t)$ , určit i funkci okamžité způsobilosti  $C(t)$ . Dále pomocí ohodnocení přechodů a stavů lze stanovit funkci celkového zisku v zadaném časovém intervalu  $Cost_T(t_1, t_2)$ . Tato veličina může být jedním ze vstupů pro metodu nákladů životního cyklu LCC (analýza nákladů životního cyklu). Definováním určitých předpokládaných scénářů popisujících chování systému v čase lze zjistit celkový vliv vložených finančních prostředků na pohotovost a způsobilost systému. Tento prostředek je vhodný především pro průmyslovou aplikační činnost.

Zatím se autor neseťkal v literatuře se spojením neexponenciálního rozdělení doby do poruchy vícecestavových systémů, preventivní údržbou a popisem výkonových konfigurací, které jsou řešeny pomocí markovské analýzy, kromě prací napsané autorem ([89], [91], [92], [93], [100] a [112]).

V aplikačním příkladě, který je součástí disertační práce, je vytvořen a vyhodnocen model spolehlivosti reálné kompresorové stanice a přilehlých trasových linií tranzitního plynovodu RWE Transgas, a.s. - příloha 4. Tento model využívá přínosů disertační práce, které jsou uvedeny v kapitolách 4, 5, 6 a 7. Pro řešení je použito softwarového prostředku uvedeného v přílohách 2 a 3.

Kompresorová stanice tranzitního plynovodu byla vybrána, protože se jedná o zařízení, které je zálohované, komponenty jsou složitě udržovány a s časem z pohledu spolehlivosti degradují. Celý systém je navíc schopen přepravovat rozdílné objemy plynu. Počet turbokompresorů a vstupních/výstupních potrubních linií v provozu je funkcí právě přepravovaného objemu plynu.

V dnešní době je v České republice, ale i v celé Evropské unii financováno mnoho projektů, které se zabývají problematikou spolehlivosti, bezpečností tranzitních sítí, ochranou systému před napadením, problematikou životního prostředí a krizového řízení. Z tohoto pohledu je řešené téma aktuální.

Tato disertační práce vznikla díky finanční podpoře projektu AV ČR číslo 1ET401940412 s názvem Modelování a kvantifikace spolehlivosti dynamických systémů a projektu MŠMT Výzkumná centra (PP2-DP01) číslo 1M0554 s názvem Výzkumné centrum Pokročilé sanační technologie a procesy.





### 3. Teoretické poznatky

#### 3.1 Základní metody spolehlivosti vhodné k zjištění pohotovosti

V disertační práci bude použito termínů, které jsou definovány v normách ČSN zabývajících se spolehlivostí. Především se jedná o texty [67], [68], [74] a [75].

Jedním z dílčích cílů autora disertační práce je aplikovat teoretické poznatky do praktického příkladu modelování kompresorové stanice tranzitního plynovodu. Tento příklad je uveden v příloze 4 disertační práce. Normy ČSN jsou často používány jako dorozumivací jazyk v praxi, proto budou v textu uvedeny odkazy, mimo jinou literaturu, i na ně.

Pro zjištění a ověření funkce okamžité pohotovosti  $A(t)$  systému se dnes v praxi nejčastěji využívá následujících základních metod spolehlivosti. Jejich seznam je uveden například v [12], [13], [73]. Odkazy na typy softwaru užívaného ve spolehlivosti lze najít v [14].

Mezi základní kvantitativní analýzy spolehlivosti lze zařadit například:

- předpověď intenzity poruch, [15], [16], [17], [18], [19], [79], [114]
- pravdivostní tabulka - analýza funkční struktury, [70]
- RBD - analýza blokového diagramu bezporuchovosti, [20], [69], [70]
- FTA - analýza stromu poruchových stavů, [21], [71], [72]
- ETA - analýza stromu událostí, [22], [23]
- MA - markovská analýza, [24], [25], [26], [27], [28], [29], [74] a [75]
- PN - analýza Petriho sítí,

Žádná jednotlivá metoda analýzy spolehlivosti není dostatečně vyčerpávající a pružná, aby se vypořádala s možnými složitostmi modelu požadovanými k vyhodnocení význačných rysů praktických systémů. Aby bylo zajištěno řádné zpracování složitých nebo multifunkčních systémů, může být nezbytné uvážit použití několika vzájemně se doplňujících metod analýzy.

Disertační práce se zabývá především rozšířením markovské analýzy.

#### 3.2 Markovská analýza ve spolehlivosti

Markovské modely ve spolehlivosti představují metodu, která umožňuje řešit dynamickou závislost charakteristik poruchy či obnovy jednotlivých součástí a přizpůsobit je stavům přechodového diagramu systému. Markovskými modely lze zachytit vlivy jak poruch komponent závislých na pořadí, tak změny intenzit přechodů vyplývající z namáhání či jiných faktorů. Z tohoto důvodu je markovská analýza vhodná metoda pro hodnocení spolehlivosti funkčně složitých konstrukcí systému a složitých strategií oprav a údržby.

Markovská metoda je založena na teorii markovských procesů, kde argument je obvykle čas. Pro výpočet ukazatelů spolehlivosti jsou obvykle v současnosti využívány homogenní markovské procesy, které vyžadují, aby byly intenzity přechodů mezi stavy konstantní.

K reprezentaci chování systému pomocí markovské analýzy je nutné stanovit všechny možné stavy systému, znázorněné graficky v přechodovém diagramu. Každému stavu je určeno, zda se jedná o provoz, částečně poruchový stav nebo poruchový stav. Provozních, částečně poruchových i poruchových stavů může být více.

Pokud u některé jednotky systému dojde k poruše, nebo na některé jednotce dojde k



obnově, „přechází“ systém v přechodovém diagramu z jednoho stavu do následujícího stavu. Přechody mezi stavy v přechodovém diagramu jsou ohodnoceny intenzitami poruch/oprav.

Každý přechod mezi stavy se ohodnotí intenzitami přechodů. Z intenzit přechodů se sestaví matice intenzit přechodů  $\mathbf{h}$ . Matice je základem pro matematický model. Následně se pro zjištění výsledné hodnoty parametrů pohotovosti nebo bezporuchovosti převede přechodový diagram na matematický model. Vyhodnocují se pravděpodobnosti, kdy systém je v čase  $t$  v jednotlivých stavech přechodového diagramu.

Při modelování je nutné splnit podmínku, že namodelovaný systém je bez paměti. Tato podmínka znamená, že budoucí chování systému závisí pouze na přítomném stavu, a ne na minulosti. Tato podmínka je splněna, jestliže:

- intenzity přechodů mezi stavy jsou časově konstantní - homogenní markovský proces,
- intenzity přechodů mezi stavy nejsou časově konstantní. Platí však, že intenzity přechodů v čase  $t_n$  jsou spjaty k pevnému časovému okamžiku  $t_{n-1}$  ( $t_n > t_{n-1}$ ) a nikoliv k časovým okamžikům předcházejícím  $t_{n-2}, \dots, t_0$  ( $t_0 < t_1 < \dots < t_{n-3} < t_{n-2} < t_{n-1}$ ) - nehomogenní markovský proces.

Pomocí matice intenzit přechodů  $\mathbf{h}$  lze řešit soustavu diferenciálních rovnic představující matematický popis přechodového diagramu  $\frac{d\mathbf{p}(t)}{dt} = \mathbf{p}(t)\mathbf{h}(t)$ . Diferenciální rovnice se obvykle řeší pomocí numerických metod, mezi kterými lze vyzdvihnout metody Runge-Kutta [5], [30], [31], [32] a metodu Monte Carlo [28], [29], [33], [34] a [35].

Typickými výstupy markovského modelu jsou pravděpodobnosti, s jakými se systém nachází v daném čase a v daném stavu. Příkladem zpracovaného výsledku pravděpodobností stavů je ukazatel funkce okamžité pohotovosti  $A(t)$ .

Z použití této metodiky plynou následující výhody. Metoda poskytuje pružný pravděpodobnostní model pro analýzu chování systému. Je možné ji přizpůsobit pro složité redundantní konfigurace, pro složitou koncepci údržby, složité modely ošetření poruchových stavů, degradované režimy provozu a poruchy se společnou příčinou. Metoda poskytuje pravděpodobnostní řešení pro moduly, které se mají vložit do jiných modelů, jako jsou blokové diagramy bezporuchovosti - RBD a stromy poruchových stavů - FTA. Metoda umožňuje přesné modelování posloupností událostí se specifickým typem nebo pořadím výskytu.

Metoda však má i jistá omezení. Zvyšujícím se počtem komponent systému exponenciálně roste počet stavů, což vede ke zvýšení pracnosti analýzy. Pro uživatele může být obtížné model sestavit a ověřit jeho správnost.

### 3.3 Statistická rozdělení popisující dobu do poruchy komponenty

Doba do poruchy komponent se nejčastěji popisuje pomocí exponenciálního rozdělení. Jeho výhodou oproti jiným rozdělením je, že doba do poruchy se nemění v závislosti na době používání komponenty, neboli intenzita poruch komponent je konstantní. Tento předpoklad platí u komponent, které nejsou dlouhodobě namáhány [15], [16], [19]. Základní charakteristiky jsou uvedeny v následujících vzorcích [42], [77]:

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

V praxi je nutné předpoklad použitelnosti popisu pravděpodobnosti bezporuchového provozu pomocí exponenciálního rozdělení ověřit. Statistické testy jsou podrobně uvedeny



například v [42] a [76].

V případě, že je shromážděno dostatek dat o době do poruchy a existují statisticky zjištěné předpoklady, že data o době do poruchy nejsou z exponenciálního rozdělení, používá se v technické praxi nejčastěji Weibullovo rozdělení. Pomocí Weibullova rozdělení se popisuje doba do poruchy namáhaných komponent. Základní charakteristiky Weibullova rozdělení jsou následující [1], [43] a [80]:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad h(t) = \frac{\beta \cdot t^{\beta-1}}{\alpha^\beta} \quad \alpha, \beta > 0$$

Stanovení, zda vstupní data pro neopravované objekty splňují exponenciální nebo Weibullovo rozdělení, a následné zjištění bodových odhadů parametrů bylo autorem použito například v [90], [101], [104] a [105].

Stanovených ukazatelů rozdělení, zjištěných pomocí této kapitoly, bude využito v disertační práci při modelování doby do přechodu (v přechodovém diagramu) aplikováním neexponenciálního rozdělení. Stanovení relevantních bodových odhadů intenzit přechodů je důležitým základem pro modely spolehlivosti a následné technické využití viz aplikační příklad v příloze 4 disertační práce.

Pro zjišťování parametrů rozdělení při sledování doby do poruchy je nutné rozlišovat následující případy:

- komponenta se po poruše skutečně opravuje (opravovaný objekt),
- komponenta se po poruše neopravuje (neopravovaný objekt).

O komponentě, která se po poruše skutečně opravuje, lze usuzovat, že má velmi podobné parametry rozdělení doby do poruchy jako shodná komponenta, u které nedošlo k poruše. V anglicky psané literatuře se tato vlastnost nazývá termínem „as good as old“. V česky psané literatuře neexistuje jednotný překlad. V této práci bude použito termínu „stejně spolehlivý jako starý“.

O komponentě, která se po poruše neopravuje, lze usuzovat, že má velmi podobné parametry rozdělení doby do poruchy jako shodná komponenta, která je zcela nová. V anglicky psané literatuře se tato vlastnost nazývá termínem „as good as new“. V této práci bude použito termínu „stejně spolehlivý jako nový“.

-----

V disertační práci používané Weibullovo rozdělení má i své nevýhody. Hlavní nevýhoda, jestliže parametr  $\beta > 1$ , spočívá v tom, že intenzita poruch v čase  $t = 0$  je nulová. Degradace mnoha systémů se projevuje až při delším čase provozování. Z tohoto důvodu je vhodné, pro dané případy, popsat intenzitu poruch komponent pomocí superpozice Weibullova a exponenciálního rozdělení ve tvaru  $h(t) = \lambda + \frac{\beta \cdot t^{\beta-1}}{\alpha^\beta}$ . Nevýhoda takto zvolené intenzity poruch spočívá v obtížném zjištění parametrů  $\lambda$ ,  $\alpha$  a  $\beta$ . [46], [47]

V literatuře jsou popsány další obměny Weibullova rozdělení například pomocí modifikovaného Weibullova rozdělení -  $R(t) = e^{-at^b e^{\lambda t}}$ . Například [49], [50] a [97]. Obdobně se ve spolehlivosti úspěšně využívá i Gamma rozdělení a jeho speciální případ Erlangovo rozdělení, normální a log-normální rozdělení [6], [7], [8] a [9].



## 4. Markovská analýza a neexponenciální rozdělení doby do přechodu

Při analýze spolehlivosti užitím markovských technik se využívá základního předpokladu, že navržený model musí být bez paměti. Předpoklad je splněn, jestliže doba do přechodu je popsána pomocí exponenciálního rozdělení, potom jsou intenzity přechodů  $h_{ij}(t)$  konstantní a je možné využít pro řešení analýzy postupu uvedeného v kapitole 3.3 disertační práce. V disertační práci se autor zabývá případy, kdy toto není splněno.

Předpoklad, že systému musí být bez paměti a popis doby do přechodu pomocí neexponenciálního rozdělení jsou dva navzájem si odporující předpoklady. Pro analýzu spolehlivosti systému je nutné buď:

- použít zjednodušené předpoklady, které zaručují markovskou vlastnost, nebo
- použít pro výpočet nehomogenní markovské procesy.

Dále bude uveden způsob, jak lze modelovat úlohy spolehlivosti pomocí markovské analýzy spolehlivosti, jestliže intenzity přechodů nejsou konstantní. V prvním bodě bude uveden model vhodný pro opravované objekty. Tento model je založen na diskrétních markovských procesech. V druhém bodě bude uveden model vhodný pro neopravované objekty. Tento model je založen na řešení pomocí metody Monte Carlo.

### Systém stejně spolehlivý jako starý

U komponenty, která je stejně spolehlivá jako stará, je po obnově intenzita přechodu  $h_{ij}(t)$  shodná, jako kdyby k poruše nedošlo. Existuje tím vztažný bod - počátek  $t = 0$ , ke kterému je vztažen veškerý čas intenzit přechodů  $h_{ij}(t)$  mezi stavy. Tento model je vhodný pro systémy, kde je komponenta po poruše opravena. Okamžité hodnoty intenzity přechodu mezi stavy  $h_{ij}(t)$  opravované komponenty jsou zobrazeny na obr. 1.

Úloha stanovení pohotovosti systému se řeší pomocí obyčejných diferenciálních rovnic s nekonstantními koeficienty. U úlohy je splněna základní podmínka, že systém je bez paměti, proto lze úlohy řešit numericky, například metodou Runge-Kutta. V prostředí MATLAB<sup>®</sup> byl vytvořen software, který řeší tuto úlohu. Zdrojový text je uveden a popsán v příloze 2.

Ideou při řešení modelu je nahrazení intenzit přechodů  $h_{ij}(t)$  střední intenzitou přechodů mezi stavy  $\overline{h_{ij}(t_m, t_{m+1})}$  podle vzorce (4.1). Následně ze znalostí středních intenzit přechodů mezi stavy  $\overline{h_{ij}(t_m, t_{m+1})}$  lze zjistit matici pravděpodobností přechodu  $\mathbf{P}(m)$  dle vzorce (4.2). Prvky této matice představují diskrétní markovský nehomogenní proces.

$$\forall i, j \in (1, \dots, N) \quad \overline{h_{ij}(t_m, t_{m+1})} = \frac{1}{(t_{m+1} - t_m)} \int_{t_m}^{t_{m+1}} h_{ij}(t) dt \quad (4.1)$$

$$\mathbf{P}(t_m, t_{m+1}) = \mathbf{I} + (t_{m+1} - t_m) \cdot \overline{\mathbf{h}(t_m, t_{m+1})} \quad (4.2)$$

Z důvodu numerické stability musí být matice  $\mathbf{P}(t_m, t_{m+1})$  stochastická, tj. prvky matice  $\mathbf{P}(t_m, t_{m+1})$  pro  $\forall i, j \in 1, \dots, N$  omezeny hodnotou  $0 \leq p_{ij}(t_m, t_{m+1}) \leq 1$ . Dále musí být splněno

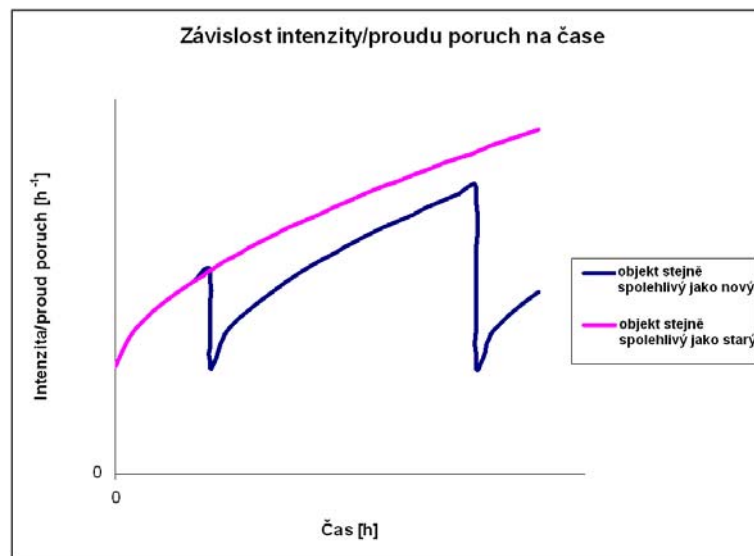


$\sum_{j=1}^N p_{ij}(t_m, t_{m+1}) = 1$ .  $p_{ij}(t_m, t_{m+1})$  představuje pravděpodobnost přechodu ze stavu  $i$  do stavu  $j$  v časovém intervalu  $\langle t_m, t_{m+1} \rangle$ .

Ze znalosti matice pravděpodobnosti přechodů  $\mathbf{P}(t_m, t_{m+1})$  se určí hodnota pravděpodobnostního vektoru  $\mathbf{p}(t_{m+1})$  pomocí vzorce 4.3.

$$\mathbf{p}(t_{m+1}) = \mathbf{p}(t_m) \mathbf{P}(t_m, t_{m+1}) \quad (4.3)$$

Protože je zjišťování střední hodnoty na daném intervalu  $\langle t_m, t_{m+1} \rangle$  pro celou matici a v každém časovém intervalu složité, je snaha výpočet zjednodušit. Pro výpočet je jednodušší a rychlejší použít hodnotu okamžité intenzity poruch ve středu intervalu  $\langle t_m, t_{m+1} \rangle = t_m + 0.5 \cdot l$ . V disertační práci je zjištěno, že nahrazením střední intenzity přechodu intenzitou přechodu ve středu intervalu je prakticky na jeden krok zanedbatelný. Relativní chyba je významně závislá pouze na délce intervalu, což je způsobeno použitou numerickou metodou. Snížení lze dosáhnout buď zmenšením kroku, nebo použitím metody Runge-Kutta vyššího řádu.



**Obr. 1:** Závislost intenzity/proudu poruch na čase pro objekty stejně spolehlivé jako starý a stejně spolehlivé jako nový

### Systém stejně spolehlivý jako nový

U objektu, který je stejně spolehlivý jako nový, je po poruše komponenta nahrazena novou. Intenzita poruch  $\lambda(t)$  nové komponenty v okamžiku výměny  $\gamma$  je shodná jako intenzita poruch komponenty staré v čase  $t=0$ . Časový posun  $\gamma$  je vztažen k časovému okamžiku obnovy. Tento okamžik  $\gamma$  není přesně znám. Tím vznikají velké potíže při řešení úlohy, protože systém je s pamětí a nelze použít pro řešení popis obyčejnými diferenciálními rovnicemi 1. řádu. Úloha se řeší pomocí metody Monte Carlo. V prostředí MATLAB<sup>®</sup> byl vytvořen software, který řeší tuto úlohu. Zdrojový text je uveden a popsán v příloze 3.



Na obr. 1 je uvedena závislost intenzity přechodu  $h_{ij}(t)$  pro objekt po poruše stejně spolehlivý jako nový a stejně spolehlivý jako starý.

Na analyzovaný systém se vytvoří přechodový diagram. Tento přechodový diagram je svojí topologií shodný s přechodovým diagramem systému, který splňuje markovskou vlastnost (komponenta po obnově je stejně spolehlivá jako stará).

Odlíšná jsou však pravidla intenzit přechodů mezi jednotlivými stavy. Každý přechod, který je popsán v přechodovém diagramu, má ve zdrojovém textu vlastní proceduru. Jednotlivé typy vkládaných procedur jsou odlišné podle typu přechodu. V práci je uveden seznam jednotlivých typů procedur. Jestliže se do přechodového diagramu přidá/odebere některý přechod ze stavu  $i$  do stavu  $j$ , vloží/odstraní se i v zdrojovém textu řešícího programu příslušná procedura.

V každé realizaci metody Monte Carlo dochází k náhodnému procházení jednotlivými stavy přechodového diagramu systému. Nechť je systém v čase  $t$  ve stavu  $i$ . Pro všechny možné přechody vycházející ze stavu  $i$  se vypočte doba do přechodu podle pravidel daných přechodem. Výsledný stav  $j$  (z množiny stavů vycházejících ze stavu  $i$ ) je dán přechodem, reprezentujícím minimální okamžik přechodu, z množiny přechodů vycházejících ze stavu  $i$ . Fyzický čas, kdy dojde k přechodu ze stavu  $i$ , je dán součtem minimální doby do přechodu ze stavu  $i$  a časem, kdy došlo k přechodu do stavu  $i$ .

Čas do přechodu ze stavu  $i$  do dalšího stavu se zjistí pomocí vygenerovaného náhodného čísla, které reprezentuje pravděpodobnost v distribuční funkci. Distribuční funkce je funkcí parametrů statistického rozdělení a času  $F(t) = f(\text{parametry}, t)$ . Řeší se inverzní úloha, kdy jsou známy parametry rozdělení, a náhodným číslem je vygenerována  $F(t)$ . V disertační práci jsou uvedeny vzorce pro některá nejčastěji používaná statistická rozdělení pro generování časů do přechodu.

-----

Způsoby řešení systémů, které jsou buď „stejně spolehlivý jako starý“, nebo „stejně spolehlivý jako nový“ se navzájem zcela vylučují. Z tohoto důvodu jsou v disertační práci v jednotlivých kapitolách uvedeny odděleně oba způsoby. Stejně tak i zdrojové texty v softwaru MATLAB<sup>®</sup>, které jsou uvedeny v příloze 2 a příloze 3, jsou odlišné pro obě metody.



## 5. Modelování údržbových zásahů

V kapitole 5 disertační práce je do markovské analýzy ve spolehlivosti vložen prostředek, který umožňuje modelovat systémy s preventivní údržbou. Markovská analýza předpokládá, že jednotlivé přechody se odehrávají ve spojitém čase - porucha nebo obnova komponenty. Dosud se pro řešení úlohy sestavila soustava diferenciálních rovnic, která se následně řešila. Výsledkem analýzy byla spojitá funkce okamžité pohotovosti  $A(t)$ . Při preventivní údržbě dochází k přechodům mezi stavy podle předem definovaných pravidel daných koncepcí údržby. Dochází k nespojitostem funkce okamžité pohotovosti  $A(t)$ .

Terminologie a rozdělení typů údržby jsou normativně popsány v [67] a [68].

V disertační práci jsou k jednotlivým typům údržeb (seznam převzat z [12]) popsány způsoby modelování pomocí markovské analýzy. Zvláštní důraz je kladen na to, zda použít model pro systém stejně spolehlivý jako starý, nebo pro systém stejně spolehlivý jako nový.

### Preventivní údržba pro systém stejně spolehlivý jako starý

Systém, který je po poruše opraven (je stejně spolehlivý jako starý) má intenzitu poruch vztaženu k počátku analýzy. Tím je zachována markovská vlastnost, že systém je bez paměti. Analyzovaný systém se nahradí soustavou diferenciálních rovnic, které se řeší například metodou Runge-Kutta.

Jestliže se v systému provádí preventivní údržba, nelze přechodový diagram systému popsat pomocí intenzity poruch/oprav. Je nutné připojit prostředek, který zajistí časově nespojitý popis pravděpodobnosti stavů - matici údržby  $\mathbf{U}(t_1, t_2)$ :

$$\mathbf{U}(t_1, t_2) = \begin{bmatrix} u_{11}(t_1, t_2) & u_{12}(t_1, t_2) & \dots & u_{1N}(t_1, t_2) \\ u_{21}(t_1, t_2) & u_{22}(t_1, t_2) & \dots & u_{2N}(t_1, t_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{N1}(t_1, t_2) & u_{N2}(t_1, t_2) & \dots & u_{NN}(t_1, t_2) \end{bmatrix}.$$

Prvek  $u_{ij}(t_1, t_2)$  matice údržby  $\mathbf{U}(t_1, t_2)$  představuje pravděpodobnost preventivní údržby v intervale  $\langle t_1, t_2 \rangle$ , kdy konfigurace systému odpovídající stavu  $i$  přejde údržbou do stavu  $j$ . V přechodovém diagramu se prvky  $u_{ij}(t)$  zadávají společně s intenzitami přechodu  $\lambda_{ij}(t)$  a  $\mu_{ij}(t)$ .

Mohou nastat následující varianty podob matice  $\mathbf{U}(t_1, t_2)$ :

- V každém řádku matice  $\mathbf{U}(t_1, t_2)$  je prvek na diagonále roven 1. V systému není provedena v daném časovém intervalu žádná preventivní údržba.
- V některém řádku matice  $\mathbf{U}(t_1, t_2)$  je prvek na diagonále nulový. Údržbovým zásahem je v daném časovém intervalu pokryta příslušná konfigurace komponent a pravděpodobnost, že údržba je provedena správně, je 1.
- V některém řádku matice  $\mathbf{U}(t_1, t_2)$  je prvek na diagonále v intervalu 0 a 1. Údržbovým zásahem je v daném časovém intervalu pokryta příslušná konfigurace komponent a pravděpodobnost, že údržba je provedena správně, je menší než 1.



- V některém řádku matice  $\mathbf{U}(t_1, t_2)$  je prvek na diagonále roven jedné. Údržbovým zásahem není v daném intervalu pokryta příslušná konfigurace komponent.

Pro matici  $\mathbf{U}(t_1, t_2)$  platí  $\forall i \sum_j u_{ij}(t_1, t_2) = 1, \forall i, j \ u_{ij}(t_1, t_2) \geq 0$ .

Maticově lze popsat provedenou preventivní údržbu systému v čase  $t$ :  $\mathbf{p}(t+u) = \mathbf{p}(t) \cdot \mathbf{U}(t)$ . Matici přechodů mezi stavy kombinovanou s maticí údržby lze zapsat do jediné rovnice 5.1

$$\mathbf{p}(t + \Delta t) = \mathbf{p}(t)(\mathbf{P}(t, t + \Delta t) \cdot \mathbf{U}(t, t + \Delta t)) \quad \Delta t \rightarrow 0 \quad (5.1).$$

Zdrojový text je naprogramován v MATLABu<sup>®</sup> a je uveden v příloze 2 disertační práce. Při výpočtu se předpokládá, že časové okamžiky preventivní údržby jsou periodické.

Jestliže je systém složen z komponent  $k_1, k_2, \dots, k_n$  různého typu, potom lze (za splnění podmínek uvedených v disertační práci) sestavit matici údržby pro každou komponentu -  $\mathbf{U}_1(t), \mathbf{U}_2(t), \dots, \mathbf{U}_n(t)$ . Každá z matic  $\mathbf{U}_1(t), \mathbf{U}_2(t), \dots, \mathbf{U}_n(t)$  má shodné vlastnosti jako matice údržby  $\mathbf{U}(t)$ , tj. stochastické matice. Pravděpodobnostní vektor v čase  $t$  po provedené údržbě se vypočte:

$$\mathbf{p}(t+u) = \mathbf{p}(t) \cdot \mathbf{U}_1(t) \cdot \mathbf{U}_2(t) \cdot \dots \cdot \mathbf{U}_n(t)$$

Nechť stav  $i, i \in 1, \dots, N$ , přechodového diagramu je dán kombinací komponent  $k_1, k_2, \dots, k_l, \dots, k_n$  ve stavu provozu a v poruše. Nechť se sestavuje matice údržby  $l$ -té komponenty - tj. matice  $\mathbf{U}_l(t_1, t_2)$ . Nechť stav  $i$  obsahuje  $r$  porouchaných komponent s označením  $l$ . Nechť jsou preventivní údržbou pokryty všechny porouchané komponenty s pravděpodobností  $p$ . Nechť systém přejde v čase  $t$  opravou jedné komponenty ze stavu  $i$  do stavu  $j$  a následně opravou dalších komponent do dalších stavů. Potom  $i$ -tý řádek matice  $\mathbf{U}_l(t)$  je tvořen nenulovými prvky, které jsou na pozicích  $i, j, \dots$ , za předpokladu, že  $0 < p < 1$ . Jestliže  $p = 1$ , potom jsou nenulové prvky v  $i$ -tém řádku na pozicích  $j, \dots$ . Hodnota těchto prvků je dána binomickým rozdělením s parametry  $Bi(r, p)$ .

### Preventivní údržba pro systém stejně spolehlivý jako nový

Systém, který je po poruše nahrazen (je stejně spolehlivý jako nový) má intenzitu poruch vztahenu k počátku provozu komponenty. Tím se ztrácí základní markovská vlastnost, že systém je bez paměti. Analyzovaný systém se řeší například metodou Monte Carlo.

V kapitole 4.3 disertační práce je uveden způsob výpočtu funkce okamžité nepohotovosti  $U(t)$  pomocí metody Monte Carlo pro systémy stejně spolehlivý jako nový, které mají dobu do přechodu popsanou pomocí Weibullova rozdělení. Přechody mezi stavy se vkládají pomocí procedur a funkcí do zdrojového textu programu.

U systému, který je stejně spolehlivý jako nový se přechody způsobené preventivní údržbou uskutečňují také pomocí vložených procedur a funkcí. Ukázka vkládaných procedur a funkcí je uvedena v kapitole 5.2 disertační práce.

Analyzovaný systém má přechodový diagram se shodnou topologií jako systém, který je stejně spolehlivý jako starý.





## 6. Výkonové konfigurace systému

[58] a [59]

Mnoho zálohovaných zařízení může, podle požadavků, pracovat nejenom na maximální provozní výkon, ale i na odlišný výkon. Ke každé komponentě je možné přiřadit informaci, jaký podíl z maximálního možného výkonu systému je schopna sama realizovat. Změnou výkonu systému se následně může změnit také funkce okamžité pohotovosti  $A(t)$  sledovaného systému. Z toho důvodu je nutné popsat systém odděleně pro plný výkon a snížený výkon, přičemž možných scénářů sníženého výkonu (výkonové konfigurace systému) je obvykle více. Lze předpokládat, že systém, který vyrábí nižší výkon, bude mít i vyšší pohotovost.

Jako příklad systému s více výkonovými konfiguracemi lze uvést výrobní systém tvořený linkami. U tohoto systému se podle požadavků na objem výroby mohou jednotlivé linky postupně uvádět z nevyužitého stavu do provozu a naopak. Dalším příkladem mohou být tranzitní soustavy, např. silniční a železniční doprava, transport plynu nebo ropy, kdy je spolehlivost systému závislá na objemu přepravy. Úloha na zjištění parametrů spolehlivosti systému, při přepravě plynu tranzitním plynovodem je uvedena v příloze 4.

Pro popis výkonových konfigurací systému je nutné, aby spolehlivost systému byla závislá na jeho výkonu. Protože se jedná typicky o zálohovaný systém, jsou při maximálním provozním výkonu obvykle všechny komponenty v provozu. Při nižším výkonu systému jsou v provozu buď všechny komponenty, které však pracují na nižší výkon, potom jsou zálohovány v aktivní záloze [67] - definice 15-02.<sup>1</sup> Nebo jsou v provozu pouze některé komponenty a ostatní jsou v nevyužitém stavu připraveny na provoz v případě poruchy, potom je systém v pohotovostní záloze [67] - definice 15-03.<sup>2</sup>

Pro každou výkonovou konfiguraci analyzovaného systému lze vytvořit blokový diagram bezporuchovosti systému (RBD diagram). RBD diagramy jsou v této disertační práci využívány z toho důvodu, že lze u nich relativně snadným způsobem zobrazit různé typy zálohování a tím pádem i různé výkonové konfigurace systému. Další výhodou je, že RBD diagramy lze převést na přechodové diagramy. Obráceně to však neplatí. Jestliže systém pracuje na menší výkon, potom může být jiný RBD model systému. Změny RBD diagramů závisí především na typu zálohování komponent, zda jsou v aktivní nebo v pohotovostní záloze. Výkonové konfigurace popisující systém mohou mít vlivem různého zálohování komponent odlišné hodnoty intenzit poruch  $\lambda(t)$  / proudů poruch  $z(t)$ .

Následně pro každou výkonovou konfiguraci a získaného RBD diagramu se sestaví přechodový diagram systému. Přechody mezi stavy se ohodnotí intenzitou poruch  $\lambda(t)$  (proudem poruch  $z(t)$ ) a intenzitou oprav  $\mu(t)$  (vztaženou k počátku simulace nebo k okamžiku obnovy). Případně je možné ohodnotit přechody pravděpodobnostmi přechodů mezi stavy  $p_{ij}(t_1, t_2)$ .

Obecně analyzovaný systém je charakterizován několika výkonovými konfiguracemi, které mají shodnou topologii přechodového diagramu, ale které se odlišují hodnotami okamžitých intenzit přechodů a definicí zda jednotlivé stavy jsou provozní, částečně poruchové nebo poruchové. Z okamžitých intenzit přechodů se vytvoří pro každou výkonovou

<sup>1</sup> Jako příklad lze uvést silniční síť a elektronické komponenty v systému.

<sup>2</sup> Jako příklad lze uvést výrobní linky, kdy v případě nižšího objemu výroby lze jednu linku vypnout.



konfiguraci:

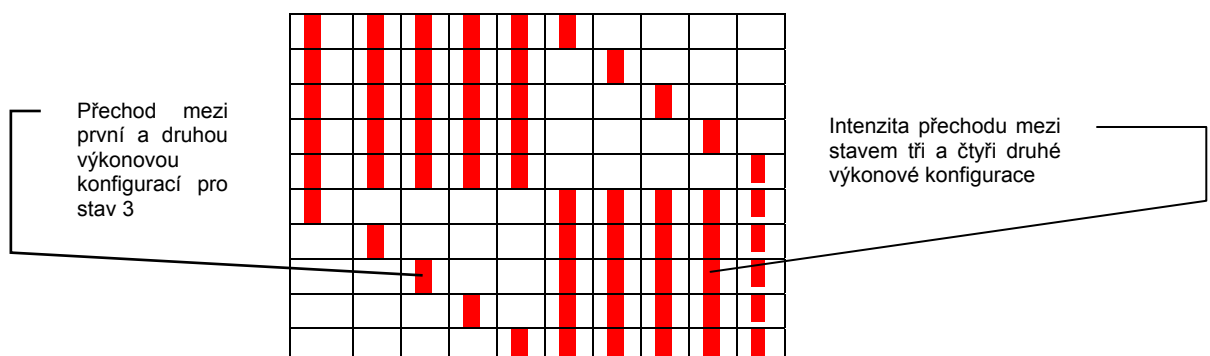
- matice pravděpodobnosti přechodů  $\mathbf{P}(t_1, t_2)$  - systém stejně spolehlivý jako starý,
- procedury vložené do zdrojového textu výpočtového programu - systém stejně spolehlivý jako nový.

### Systém stejně spolehlivý jako starý

Model systému může přecházet poruchou, obnovou či údržbou komponent v rámci jedné výkonové konfigurace mezi stavy podle pravidel přechodového diagramu. Přechody jsou dány maticí pravděpodobnosti přechodů  $\mathbf{P}(t_1, t_2)$ . Dále model systému může přecházet mezi odpovídajícími stavy různých výkonových konfigurací podle předem daných pravidel. Z tohoto důvodu je nutné, aby jednotlivé výkonové konfigurace měly shodnou topologii přechodového diagramu. Přechody mezi konfiguracemi mohou být buď časově spojitě, tzn. že mohou nastat kdykoliv v čase. Tento systém lze popsat pomocí matice intenzit přechodů  $\mathbf{h}(t)$  a následně převést soustavu na matici pravděpodobností přechodů  $\mathbf{P}(t_1, t_2)$ . Nebo mohou nastat pouze v určitých diskrétních časech a pak je nutné popsat systém pomocí matice pravděpodobnosti přechodů  $\mathbf{P}(t_1, t_2)$ .

Systém s  $\nu$  různými výkonovými scénáři se řeší maticí pravděpodobnosti přechodů, která má  $\nu$  bloků kolem diagonály. Každý scénář s příslušnou výkonovou konfigurací reprezentuje jeden blok. Každý výkonový scénář reprezentovaný blokem je čtvercový a má tolik řádků a sloupců, jako je počet stavů přechodového diagramu každé výkonové konfigurace. Dále jsou v matici přechody mezi různými výkonovými konfiguracemi odpovídajících stavů. Tyto pravděpodobnosti přechodů jsou topologicky rovnoběžné s diagonálou matice pravděpodobnosti přechodů  $\mathbf{P}(t_1, t_2)$ .

Na obr. 2 je ukázána struktura pravděpodobností matice přechodu s nenulovými prvky. Systém má pět stavů a vyskytuje se ve dvou výkonových konfiguracích. Červeně jsou vyznačeny prvky  $ij$  matice pravděpodobnosti přechodů, které mohou nabývat nenulových hodnot. Ostatní bílé prvky jsou vždy nulové.



**Obr. 2:** Struktura matice pravděpodobností přechodů pro dvě výkonové konfigurace

### Systém stejně spolehlivý jako nový



Model systému, který je stejně spolehlivý jako nový, může přecházet v rámci jedné výkonové konfigurace mezi stavy podle přechodového diagramu. Přechody jsou dány pravidly, které jsou vkládány ve formě procedur do zdrojového textu programu (příloha 3). Dále může přecházet mezi různými výkonovými konfiguracemi.

Přechody mezi konfiguracemi mohou být buď časově spojité, nebo mohou nastat pouze v určitých diskrétních časech.

V prvním případě, kdy dochází k časově spojitým přechodům, se přechod mezi odpovídajícími stavy různých výkonových konfigurací modeluje obdobně jako intenzity přechodů.

V druhém případě, kdy dochází k přechodu pouze v určitých diskrétních časech, se přechody mezi odpovídajícími stavy různých výkonových konfigurací modelují obdobně jako preventivní údržba.



## 7. Závěr

V disertační práci byly v rámci markovské analýzy ve spolehlivosti dosaženy následující hlavní výsledky:

1. sestavení modelu neexponenciálního rozdělení doby do přechodu,
2. sestavení modelu preventivní údržby,
3. sestavení modelu výkonových konfigurací systému.

Ad 1: Použití markovské analýzy předpokládá, že doba do přechodu mezi stavy splňuje exponenciální rozdělení. Tento předpoklad je velmi omezující pro tvorbu analýz. V kapitole 4 jsou řešeny dva základní modelové případy.

- V prvním případě je intenzita poruch po obnově komponenty shodná jako u komponenty, u které k poruše nedošlo - systém je stejně spolehlivý jako starý (as good as old). Při řešení byla sestavena soustava obyčejných diferenciálních rovnic s nekonstantními parametry a následně vypočtena numericky.
- V druhém případě je intenzita poruch po obnově je shodná jako u nové komponenty - systém je stejně spolehlivý jako nový (as good as new). Úloha se řeší pomocí metody Monte Carlo, kdy jednotlivé přechody z přechodového diagramu jsou do hlavního programu vkládány pomocí funkcí a procedur.

Případy, kdy intenzita poruch po obnově komponenty je mezi těmito dvěma limitními případy, není v disertační práci řešena.

Ad 2: Při řešení obvyklé úlohy markovskou analýzou se sestaví soustava diferenciálních rovnic, která se následně řeší. Výsledkem jsou spojité funkce okamžité pohotovosti  $A(t)$  systému. V kapitole 5 je uveden prostředek, který připojuje k markovské analýze preventivní údržbu. Tento prostředek má za následek, že funkce okamžité pohotovosti není spojitá. Řešení tohoto problému je pak závislé na tom, zda je systém stejně spolehlivý jako starý či jako nový.

V prvním případě se sestaví diferenciální rovnice. V čase, kdy dochází k preventivní údržbě je pravděpodobnostní vektor  $\mathbf{p}(t)$  vynásoben maticí údržby  $\mathbf{U}(t)$ , čímž se získá nová hodnota vektoru  $\mathbf{p}(t+u)$ . Nová hodnota vektoru  $\mathbf{p}(t+u)$  charakterizuje hodnotu vektoru po údržbě.

V druhém případě se sestaví procedury, které jsou součástí řešícího softwaru. Tyto procedury zajistí přechod z jednoho stavu do dalšího.

Software neřeší úlohu, kdy dochází k preventivní údržbě, která však není periodická.

Ad 3: V kapitole 6 je vytvořen prostředek, který umožňuje modelovat výkonové konfigurace systému. Tento prostředek je využitelný, jestliže je systém zálohován a jeho spolehlivost je závislá na objemu výroby - například při modelování spolehlivosti tranzitních sítí. Princip je založen na vytvoření několika přechodových diagramů popisujících různý objem výroby. Tyto přechodové diagramy mají shodnou topologii, ale jsou odlišné v intenzitách přechodu a definici provozuschopnosti stavů.

Všechny uvedené výsledky jsou implementovány do zdrojového textu naprogramovaného v programu MATLAB<sup>®</sup>. Zdrojové texty jsou přílohou disertační práce.

V kapitole 8 je řešen aplikační příklad - modelování kompresorové stanice tranzitního



plynovodu. V této kapitole je využito vše, co bylo teoreticky popsáno v kapitolách 4 až 7. Na systému je definováno 10 různých výkonových konfigurací. Dle charakteru analyzovaného systému se předpokládá, že komponenty mají neexponenciální dobu do poruchy a mají navíc preventivní údržbu. Bylo vytvořeno a řešeno mnoho scénářů, které popisovaly chování systému v závislosti na změně:

- výkonové konfigurace,
- střední doby do poruchy,
- typu rozdělení doby do poruchy,
- preventivní údržby.

Modelování kompresorové stanice tranzitního plynovodu RWE Transgas bylo jedním z dílčích cílů úspěšně obhájeného projektu AV 1ET401940412 s názvem Modelování a kvantifikace spolehlivosti dynamických systémů.

## Conclusion

The following results were concluded using the Markov analysis in dependability:

1. construction of model with non-exponential distribution of time to transition
2. construction of maintenance model with forward intervals
3. construction of model of system performance configuration

1) The use of the Markov analysis supposes that the time to transition between two postures fulfil the conditions of exponential distribution. This hypothesis is very limited in analysis construction. There are two basic examples solved in chapter 4

- In first case the failure rate after the component recovery is equally as limiting as the rate by component, which was fault-free. The system is “as good as old”. The mathematical solving of this case was realized after the construction of an ordinary differential equation system with non-constant parameters.
- In the second case the failure rate after component recovery is the same as the rate by component, which was new. System is “as good as new”. The Monte Carlo method can be used to solve this case, where each transition is inserted from a transition diagram to the main program with the help of functions and procedures.

In such cases where the failure rate between two causes is limited, this thesis does not attempt to make a solution.

2.) The system of differential equation is constructed through the ordinary tasks of the Markov analysis. The results of it are continuous function of actual system emergency  $A(t)$ .

Forward intervals as an instrument, which extends Markov analysis is mentioned in chapter 5. This instrument states that the function of an actual system emergency is not continuous. The solving of this problem depends on the fact that the system is „good as old“ or „good as new“.

In first cause differential equations are constructed. In the time of forward intervals maintenance is dependability vector  $\mathbf{p}(t)$  multiplied by maintenance array  $\mathbf{U}(t)$ , which causes a new value of vector  $\mathbf{p}(t+u)$ . This new value characterises the vector value after maintenance.

In second cause the procedures, which are components of solving software are constructed.



These procedures ensure transition from one to another posture. The software doesn't solve the task, when the forward intervals maintenance is not periodic.

3.) In chapter 6 an instrument is mentioned, which allows modelling of systems performance configuration. This instrument is useful, when the system is backed up and its dependability depends on the production volume - for example modelling of transit networks. The principle of modelling is based on the creation of some transition diagrams, which describe different production volume. These transition diagrams have the same topology, but different intensity rates and definition of postures serviceability. All the mentioned results are implemented into source text through the software, MATLAB<sup>®</sup>. Source texts are mentioned in appendix of this thesis.

In chapter 8 the application task is solved - modelling of transit networks compressor station. In this task all benefits were applied, which were theoretically described in chapters 4 - 7. It was defined 10 performance configuration of system. On the base of the analyzed system character is supposed, that failure rates of components are non - exponential and also has maintenance with forward intervals. Many cases were created and solved, which described the behaviour in context of the following changes.

- performance configuration,
- average failure rate,
- distribution type of failure rate,
- maintenance with forward intervals.

Modelling of a compressor station of a gas pipeline RWE Transgas was one of the fractional aims of the project AV 1ET401940412 (modelling and quantification of dynamic systems dependability), which was successfully upheld.



## 8. Literatura

### Knihy, články a časopisy

- [1] Briš R., *Inovační metody pro ocenění spolehlivosti prvků a systémů*, Monografie 1. vydání, Ostrava, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, ISBN 978-80-248-1596-1
- [2] Kořenář V., *Stochastické procesy*, Praha, Vysoká škola ekonomická v Praze, 1998, ISBN 80-7079-813-0
- [3] Walter J., *Stochastické modely v ekonomii*, Praha, SNTL, 1970, 196 s.
- [4] Walter J., *Stochastické procesy*, Praha, SPN, 1983
- [5] Škrášek J., Tichý Z., *Základy aplikované matematiky III*, Praha, SNTL, 1990
- [6] Tichý Z. a kol., *Aplikovaná matematika I a II*, Praha, SNTL, 1978, 2386 s.
- [7] Šor J. B., *Statističeskije metody analiza i kontrolja kačestva i nadějnosti*, Radio Moskva 1962
- [8] Šor J. B., *Praktické problémy teorie spolehlivosti*, ČVUT Praha, 1967
- [9] <http://www.weibull.com/systemrelwebcontents.htm>
- [10] MIL-HDBK 338B, *Electronic reliability design handbook*, 1998
- [11] Schüller J. C. H., Brinkman J. L., Van Gestel P. J., van Otterloo R. W., *Methods for determining and processing probabilities „Red Book“*, Publication Series on Dangerous Substances 4, The Committee for the Prevention of Disasters by Hazardous materials, Nederland, 2005
- [12] Fuchs P., Vališ D., *Metody analýzy a řízení rizika*, TUL, Liberec, 2004  
<http://flow.kmo.tul.cz/~www/czech/predmet.php?id=13&t=soubory> [22. 2. 2008]
- [13] Fuchs P., *Využití spolehlivosti v provozní praxi*, TUL, Liberec, 2004  
<http://flow.kmo.tul.cz/~www/czech/predmet.php?id=13&t=soubory> [22. 2. 2008]
- [14] Vališ D., *Software pro podporu spolehlivosti*, materiály Odborné skupiny pro spolehlivost 27. setkání, ČSJ Praha, 2007
- [15] MIL-HDBK-217F, *Reliability prediction of electronic equipment*, 1991
- [16] <http://src.alionscience.com/spidr/>
- [17] Vitr M., *Současné přístupy k predikci bezporuchovosti prvků*, ČSJ Praha, Perspektivy jakosti, Vol. 2 (2005), No.3, pp. 27-31, ISSN 1214-8865
- [18] Vitr M., *Přehled metod a nástrojů pro odhad bezporuchovosti prvků*, ČSJ Praha, 27. setkání Odborné skupiny pro spolehlivost, pp. 26-57
- [19] Matějček, *Katalog spolehlivosti elektrotechnických a elektronických výrobků*, Tesla, k. p., 1985
- [20] System analysis reference: Reliability, Availability and Optimization  
<http://www.weibull.com/systemrelwebcontents.htm>
- [21] Vesely W. E., Goldberg F. F., *Fault tree Handbook*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG 492
- [22] <http://www.event-tree.com/>



- [23]<http://www.eventtreeanalysis.com/>
- [24]Barlow R.E., Proschan F., *Statistical Theory of Reliability and Life Testing. Probabilistic Models*, New York, Holt, Rinehart and Winston, 1975
- [25]Billinton R., Allan R.N., *Reliability Evaluation of Engineering Systems. Concepts and Techniques*. Second Edition, New York, Plenum Press, 1992
- [26]Birolini A., *Quality and Reliability of Technical Systems. Theory - Practise - Management*, Berlin, Springer Verlag, 1994
- [27]Lisnianski A., Levitin G., *Multi-state system reliability*, World Scientific Publishing Co., 2003, ISBN 981 238-306-9
- [28]Levitin G., *The Universal Generating Function in Reliability Analysis and Optimization*, Springer, ISBN 185 233-927-6
- [29]Tůma J., Rusek S., Martínek Z., Chemišinec I., Goňo R.: *Spolehlivost v elektroenergetice*, ČVUT Praha, ISBN 80-239-6483-6
- [30]Rektorys K., *Přehled užití matematiky*, Prométheus, Praha 1995, ISBN 80-7196-1795
- [31]Vitásek E., *Numerické metody*, SNTL 1987
- [32] Ralston A., Rabinowitz P., *A first course in numerical analysis*, Dover Publications 2001, ISBN 0-486-41454-X
- [33] Fishman G. S., *Monte Carlo: Concepts, Algorithms and Applications*, Volume 1 od Springer Series in Operations Research, Springer-Verlag, New York, 1996
- [34]Virius M., *Aplikace matematické statistiky: metoda Monte Carlo*, ČVUT Praha 1998
- [35] Fabian F., Kluiber Z.: *Metoda Monte Carlo a možnosti jejího uplatnění*, Prospektrum s.r.o., Praha 1998
- [36]System analysis reference: Reliability, Availability and Optimization  
<http://www.weibull.com/systemrelwebcontents.htm>
- [37]Hammersley J.M., Handscomb D.C., *Monte Carlo methods*, Methuen &Co Ltd., 1965
- [38]*Using Weibull++ 7 and Monte Carlo simulation for probabilistic design*, Reliability HotWire č. 56, 2005  
<http://www.weibull.com/hotwire/issue56/hottopics56.htm>
- [39]Wilkins J. D.: *The bathtub curve and produkt failure behavior*, Reliability HotWire, č. 21 a 22, 2002  
<http://www.weibull.com/hotwire/issue21/hottopics21.htm>  
<http://www.weibull.com/hotwire/issue22/hottopics22.htm>
- [40]Jiang R., Murthy D.N.P.: *The exponentiated Weibull family: A graphical approach*, IEEE Transactions on Reliability, 1999, p. 68-72
- [41]<http://www.weibull.com/GPaper/index.htm>
- [42]<http://www.weibull.com/lifedatawebcontents.htm>
- [43]Farnum N.R., Booth P., *Uniqueness of maximum likelihood estimators of the 2-parameter Weibull distribution*, IEEE Transaction on Reliability, 1997, p. 523-525
- [44]*Likelihood ratio konfidence bounds*, Reliability HotWire, č. 42, 2004  
<http://www.weibull.com/hotwire/issue42/re basics42.htm>





- [45] Shimokawa T., Liao M.: *Goodness-of-fit tests for type-I extreme-value and 2-parameter Weibull distributions*, IEEE Transactions on Reliability, 1999, p. 79-86
- [46] Praks P., Bacarizo H. F., Labeau P. E., *On the modeling of ageing using Weibull models: Case studies*, Safety, Reliability and Risk Analysis - ESREL 2008, p. 559-565, ISBN 13-978-0-415-48513-5
- [47] Hsieh H. K.: *Prediction intervals for Weibull observations, based on early failure data*, IEEE Transactions on Reliability, 1996, p. 666-670
- [48] Klutke G. A., Kiessler P.C., Wortman M.A., *A Critical look at the bathtub curve*, IEEE Transactions on Reliability, 2003 p. 125-129
- [49] Lai C. D., Xie M., Murthy D. N. P., *A Modified Weibull Distribution*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 52 No. 1, 2003, p. 33-37
- [50] Ng H. K. T., *Parameter Estimation for a Modified Weibull Distribution for Progressively Type-II Censored Samples*, IEEE Transactions on Reliability, Vol. 54 No. 3, 2005, p. 374-380
- [51] Vintr Z., *Co lze najít na internetu o spolehlivosti*, Univerzita obrany Brno, 2005
- [52] *Using Weibull++ 7 and Monte Carlo simulation for probabilistic design*, Reliability HotWire č. 56, 2005  
<http://www.weibull.com/hotwire/issue56/hottopics56.htm>
- [53] [www.itemsoft.com](http://www.itemsoft.com)
- [54] [www.relex.com](http://www.relex.com)
- [55] [www.isograph-software.com](http://www.isograph-software.com)
- [56] [www.sohar.com](http://www.sohar.com)
- [57] [www.rmclogan.co.uk](http://www.rmclogan.co.uk)
- [58] Platis A, Limnios N., Du M. L., *Performability of electric-power systems modeled by non-homogeneous Markov chains*, IEEE Transactions on reliability, 1996, p. 605-610
- [59] Kyandoghere K., *Reliability modeling & performance of variable link-capacity networks*, IEEE Transactions on reliability, 1998, p. 44-45
- [60] Cassady C.R., *A Generic Model of Equipment Availability Under Imperfect Maintenance*, IEEE Transactions on reliability, 2005, p. 564-571
- [61] Sheu H.S., Lin Y.B., Liao G.L., *Optimum policies for a system with general imperfect maintenance*, Reliability engineering & system safety, 2006, p. 362-369
- [62] Zequeira R.I., Bérenguer C., *Periodic imperfect preventive maintenance with two categories of competing failure modes*, Reliability engineering & system safety, 2006, p. 460-468
- [63] *Financial applications for Weibull analysis*, Reliability HotWire, č. 14, 2002  
<http://www.weibull.com/hotwire/issue14/hottopics14.htm>
- [64] Moubray J. M.: *Reliability-centered Maintenance*, New-York, 1999
- [65] Svoboda A. a kolektiv, *Plynárenská příručka - 150 let plynárenství v Čechách a na Moravě*, GAS s.r.o, Praha 1997, ISBN 80-902339-6-1, 1308 stran
- [66] Fuchs P., *Údržba zaměřená na bezporuchovost*, 21. setkání OSS, Praha 2005



## Technické normy

- [67] ČSN IEC 50(191) (01 0102), *Mezinárodní elektrotechnický slovník, kapitola 191: Spolehlivost a jakost služeb*, Federální úřad pro normalizaci a měření, 1993
- [68] ČSN EN 13306 (01 0660) *Terminologie údržby*, ČNI Praha 2002
- [69] ČSN IEC 1078 (01 0677):1993 *Metody analýzy spolehlivosti metoda blokového diagramu bezporuchovosti*. ČSN Praha, 1993
- [70] ČSN EN 61078 (01 0677):2007, *Techniky analýzy spolehlivosti - Blokový diagram bezporuchovosti a booleovské metody*, ČSN Praha 2007
- [71] ČSN IEC 1025 (01 0676):1993, *Analýza stromu poruchových stavov*, ČNI Praha, 1993
- [72] ČSN EN 61025(01 0676):2007, *Fault tree analysis*, 2006
- [73] ČSN IEC 60300-3-1 (01 0690), *Management spolehlivosti - Část 3-1: Pokyn k použití - Techniky analýzy spolehlivosti - Metodický pokyn*, 2003
- [74] ČSN IEC 1165 (01 0691):1996, *Použití Markovových metod*, ČNI Praha, 1996
- [75] ČSN EN 61165 (01 0691):2007 *Použití Markovových metod*. ČNI Praha, 2007
- [76] ČSN IEC 60605-6 (01 0644-6) *Zkoušení bezporuchovosti zařízení - Část 6: Testy platnosti předpokladu konstantní intenzity poruch nebo konstantního parametru proudu poruch*, ČNI 1998
- [77] ČSN IEC 60605-4 (01 0644-4) *Zkoušení bezporuchovosti zařízení - Část 4: Statistické postupy pro exponenciální rozdělení - Bodové odhady, konfidenční intervaly, předpovědní intervaly a toleranční intervaly*, ČNI 2002
- [78] ČSN EN 61164 (01 0647) *Růst bezporuchovosti - Metody statistických testů a odhadů*, ČNI Praha 2005
- [79] ČSN IEC 61609 (01 0649), *Elektronické součástky - Bezporuchovost - Referenční podmínky pro intenzity poruch a modely namáhání pro přepočty*
- [80] ČSN IEC 61649 (01 0653) *Testy dobré shody, konfidenční intervaly a dolní konfidenční meze pro data s Weibullovým rozdělením*, ČNI Praha 1998
- [81] ČSN IEC 60300-3-11 (01 0690-3-11) *Management spolehlivosti - Část 3-11: Návod k použití - Údržba zaměřená na bezporuchovost*, ČNI Praha, 1999
- [82] ČSN EN 60300-3-3 (01 0690-3-3) *Management spolehlivosti - Část 3-3: Pokyn k použití - Analýza nákladů životního cyklu*, ČNI Praha 2005



## Publikační činnost autora

### Konference

- [83] Chudoba J., *Evaluation of dependability by using Markov analysis*, International Congress ECMS 2005 Electronics, Controle, Modeling, Measurement and Signále, Toulouse 2005, Evaluation of dependability by using Markov analysis
- [84] Chudoba J., *What is possible to find out from railroad akcident statistics*, konference Věda a krizové situace, TUO Ostrava 2005, ISBN 80-248-0944-3
- [85] Chudoba J., *Zpracování dat o poruchách výrobků z provozu*, konference CQR, Hejnice 2006
- [86] Praks P., Bris R., Chudoba J.: *Motivace k modelování spolehlivosti kompresorové stanice tranzitního plynovodu s přihlédnutím k dynamickému chování dispečera*, Sborník abstraktů semináře aplikované matematiky SAMO'06, TUO Ostrava 2006, ISBN 80-248-1151-0
- [87] Chudoba J., *Analysis of the probability of car accidents*, Reliability, safety and diagnostics of transport structures and means 2005, Pardubice 2005, ISBN 80-7194-769-5
- [88] Chudoba J.: *Hodnocení přesnosti výsledků z metody FMECA*, In: Request '06, Ed. Centrum pro jakost a spolehlivost výroby, ČVUT Praha 2007, ISBN 978-80-01-03709-6
- [89] Praks P., Chudoba J., Briš R.: *Modelování spolehlivosti kompresorové stanice tranzitního plynovodu užitím spojitých markovských procesů*, Ed. Centrum pro jakost a spolehlivost výroby, ČVUT Praha 2007, ISBN 978-80-01-03709-6
- [90] Chudoba J.: *Determination of cause for increased failure rate of electrical components*, 9<sup>th</sup> international scientific conference Applied Mechanics 2007, TUO Ostrava 2007, ISBN 978-80-248-1389-9
- [91] Praks P., Chudoba J., Briš R., Koucký M.: *Reliability analysis of a natural gas compression station and surrounding gas pipeline network with assuming of performance changes by a dispatcher*, In: Proceedings of the European Safety and Reliability Conference 2007 (ESREL 2007). Ed. Terje Aven&Jan Erik Vanen, London: Taylor&Francis Group, 2007, ISBN 978-0-415-44786-7
- [92] Chudoba J., *Model spolehlivosti kompresorové stanice tranzitního plynovodu s neexponenciální dobou do poruchy komponent*, Věda a krizové situace 2007, Ostrava, 23.10.2007, ISBN 978-80-7385-011-1
- [93] Chudoba J., *Model spolehlivosti kompresorové stanice tranzitního plynovodu s užitím markovských procesů*, Opatřebení spolehlivost diagnostika 2007, Brno, 2007, ISBN 978-80-7231-294-8
- [94] Chudoba J., Praks P.: *Reliability analysis of a natural gas compression station and probability estimation of non-delivery of agreed amount of the gas*, Současnost a budoucnost krizového řízení 2007, Praha 2007
- [95] Chudoba J., *Metody spolehlivosti a jejich využití v ekonomii*, In. VII. Mezinárodní konference studentů doktorských studijních programů IMEA, Ed. Kocourek Aleš, Technická univerzita v Liberci, 2008, ISBN 978-80-7372-331-6
- [96] Chudoba J., *Modelování spolehlivosti kompresorové stanice tranzitního plynovodu metodou markovských procesů za využití metody Monte Carlo*, In.13. vedeckej konference Riešenie krízových situácií v špecifickém prostredí, Ed. Fakulta



špeciálneho inžinierstva Žilinskej univerzity v Žiline, ISBN 978-80-8070-846-7, 2008

- [97] Chudoba J., *Případová studie využitelnosti modifikovaného Weibullova rozdělení při popisu doby do poruchy*, konference Request 2008, Brno 2008
- [98] Chudoba J., *Reliability analysis of a natural gas compression station, prediction of a profit and loss arise from estimation of non-delivery of agreed amount of the gas*, In. 26<sup>th</sup> International Conference Mathematical Methods in Economics 2008, Ed. Kocourek Aleš, Technická univerzita v Liberci, 2008 ISBN 978-80-7372-387-3
- [99] Chudoba J., *Reliability Modelling of Gas Line Compression Station by Markov Process Method and by further Application of Monte-Carlo Method*, Fakulta bezpečnostního inženýrství, TUO Ostrava, 2008

#### **Publikované články**

- [100] Chudoba J., *Modelování spolehlivosti průmyslové soustavy*, Odborná skupina pro spolehlivost, 28. setkání, Česká společnost pro jakost, Praha 2007, ISBN 978-80-02-01965-7

#### **Technické zprávy**

- [101] Ságl P., Chudoba J., *Rozbor degradace typů komponent v rámci M3-5, ČEZ, a.s., JE Dukovany, celek 1*, zpráva Technické univerzity v Liberci, 2007
- [102] Chudoba J., *Posouzení spolehlivosti a důsledků změny intervalu zkoušení pojistných ventilů rafinérie Kralupy*, zpráva Technické univerzity v Liberci, 2005
- [103] Chudoba J., *Stanovení pravděpodobnosti nehody při transportu osobním automobilem*, zpráva Technické univerzity v Liberci, 2004
- [104] Chudoba J., Ságl P., *Určení příčin zvýšené poruchovosti signálů řady IS, KIS v jaderné elektrárně Dukovany*, zpráva Technické univerzity v Liberci, 2007
- [105] Fuchs P., Chudoba J., *Řešení problematiky spolehlivosti vstřikovacích forem Cadence Innovation při zvýšeném počtu zdvihů*, zpráva Technické univerzity v Liberci, 2007
- [106] Fuchs P., Vališ D., Chudoba J., Kamenický J., Zajíček J., *Bezporuchovost a životnost - Techniky analýzy bezporuchovosti*, skripta Technické univerzity v Liberci, 2006
- [107] Fuchs P., Vališ D., Chudoba J., Kamenický J., Zajíček J., *Řízení spolehlivosti*, elektronický učební text k předmětu Řízení jakosti a spolehlivosti, Liberec, 2006
- [108] Chudoba J., *Dynamické modelování kritičnosti komponent a zařízení složitých průmyslových soustav - Komplexní rešerše přístupů k vytváření a využívání pravděpodobnostně orientovaných spolehlivostních modelů složitých technologických soustav s dynamickými prvky*, zpráva Technické univerzity v Liberci, 2006
- [109] Chudoba J., *Alternativní výpočet optimálního počtu náhradních dílů systému kontroly a řízení Jaderné elektrárny Dukovany*, zpráva Technické univerzity v Liberci, 2005
- [110] Chudoba J., *Dynamické modelování kritičnosti komponent a zařízení složitých průmyslových soustav - Příprava a zpracování komplexní informace o aktuálním stavu a možnostech využití metodologie markovských procesů při řešení otázek dynamického modelování spolehlivosti*, zpráva Technické univerzity v Liberci, 2006
- [111] Chudoba J., *Metodický pokyn k softwaru Hodnocení spolehlivosti - DPD*, zpráva Technické univerzity v Liberci, 2007
- [112] Chudoba J., *Dynamický model spolehlivosti kompresorové stanice tranzitního*



*plynovodu*, zpráva Technické univerzity v Liberci, 2007

- [113] Chudoba J., *Modelování dynamické spolehlivosti užitím stochastických procesů*, disertační teze, Technická univerzita v Liberci, 2008

#### **Software**

- [114] Balatka M., Chudoba J., *Intepor-intenzita poruch*, verze 2.0 (poslední aktualizace 3. 10. 2005), Technická univerzita v Liberci

#### **Vedení ročníkových projektů a bakalářských prací**

Obhájené

- [115] Bezr J., *Určení pohotovosti vstříkovacího stroje v Cadence Innovation k.s.*, bakalářská práce, Technická univerzita v Liberci, 2007
- [116] Dolina J., *Statistické a spolehlivostní vyhodnocení reálné komponenty*, ročníkový projekt, Technická univerzita v Liberci, 2007
- [117] Polák J., *Určení pohotovosti vstříkovací formy v Cadence Innovation k.s.*, bakalářská práce, Technická univerzita v Liberci, 2007

Zvolené ročníkové projekty a bakalářské práce pro školní rok 2008 až 2009

- [118] Nguyen B. H., *Vytvoření slovníku spolehlivosti*, ročníkový projekt
- [119] Šarman A., *Tvorba formuláře na sběr dat po poruchách*, bakalářská práce
- [120] Taneček M., *Zpracování dat o poruchách z provozu RWE Transgas*, bakalářská práce
- [121] Teubelová H., *Statistické zjištění vztahů mezi kurzy akcií a indexem PX na Burze cenných papírů*, ročníkový projekt
- [122] Trégl P., *Vytvoření softwaru zajišťující zjištění parametrů neexponenciálních rozdělení*, bakalářská práce
- [123] Váňa M., *Zjištění použitelnosti modifikovaného Weibullova rozdělení*, bakalářská práce