

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

SPOLEHLIVOST TRADIČNÍ I NETRADIČNÍ



**Materiály z 28. setkání
odborné skupiny pro spolehlivost**

Praha, září 2007

OBSAH

STANOVENÍ SPOLEHLIVOSTI ZAŘÍZENÍ Z PROVOZNÍCH DAT 3

Ing. Jan Kamenický

MODELOVÁNÍ SPOLEHLIVOSTI PRŮMYSLOVÉ SOUSTAVY 8

Ing. Josef Chudoba

APLIKACE FMECA PŘI HODNOCENÍ RIZIKA DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY 29

Ing. Jaroslav Zajíček

HODNOCENÍ KRITičNOSTI NÁRODNÍ INFRASTRUKTURY 38

Ing. Pavel Fuchs, CSc.

STANOVENÍ SPOLEHLIVOSTI ZAŘÍZENÍ Z PROVOZNÍCH DAT

Ing. Jan Kamenický, Ústav řízení systémů a spolehlivosti, Technická univerzita v Liberci
jan.kamenicky@tul.cz

1. Úvod

Elektrická energie je nezbytným předpokladem růstu každé výkonné ekonomiky. Nestačí ovšem udržovat v provozu stávající energetická zařízení, ale je třeba nadále vyvíjet a budovat nové energetické zdroje. Při této činnosti je vhodné se poučit z chyb a nedostatků již provozovaných strojů a zařízení. Databáze údajů jsou většinou dostupné, ovšem jejich zpracování není provedeno, protože nepřináší okamžitý efekt a je ekonomicky výhodné až z dlouhodobého hlediska. Příklady, použité v příloze dokumentu, jsou převzaty z již hotových spolehlivostních analýz čerpadel firmy Sigma Group, a.s., která si včas uvědomila nutnost takového kroku pro zachování konkurenceschopnosti na trhu.

2. Přehled použitých zkratk a symbolů

A	očekávaný počet poruch
$MTBF$	střední doba mezi poruchami [h]
$MTTR$	střední doba do obnovy [h]
$MTBF_D, MTBF_H$	dolní a horní mez dvoustranného konfidenčního intervalu skutečné hodnoty střední doby mezi poruchami
$MTTR$	střední doba do obnovy [h]
$MTTR_D, MTTR_H$	dolní a horní mez dvoustranného konfidenčního intervalu skutečné hodnoty střední doby do obnovy
U	součinitel asymptotické nepohotovosti [1]
λ	intenzita poruch [h^{-1}]
λ_D, λ_H	dolní a horní mez dvoustranného konfidenčního intervalu skutečné hodnoty intenzity poruch
T	celková kumulovaná doba provozu [h]
t	kalendářní doba, po které byla ukončena zkouška [h]
r	celkový počet poruch [1]
r_i	empirická četnost poruch za uvažovaný interval
T_p	celková kumulovaná doba, po kterou bylo zařízení v poruše [h]
λ_D, λ_H	dolní a horní mez dvoustranného konfidenčního intervalu skutečné hodnoty intenzity poruch [h^{-1}]
χ^2	označení rozdělení chí-kvadrát

3. Datová část

3.1 Sběr dat

Pro zjištění provozní spolehlivosti jednotlivých technologických zařízení je zapotřebí získat data o jejich provozních podmínkách, politice údržby a samozřejmě o poruchách a následných opravách. Energetika v ČR je rozdělena do několika odvětví. Samostatnou kapitolou je jaderná oblast, která je mimo jiné pod značným mediálním tlakem. Z tohoto důvodu je tato část energetiky o krok napřed. Jaderné elektrárny mají vlastní systém pro zaznamenávání poruch a oprav zařízení, ovšem i tato data bylo nutné pro účely analýzy upravit. Druhou zkoumanou oblastí jsou tzv. klasické elektrárny. V ČR existuje software pro sledování poruch všech uhelných elektráren, jeho výhody a nedostatky jsou uvedeny v příkladu aplikace metodiky. Zaznamenaná data nejsou dostatečně zpracována ani v jedné z uvedených oblastí.

Pro statistické vyhodnocení poruchovosti zařízení jednoho typu je třeba získat co největší reprezentativní vzorek, tedy v ideálním případě data o všech strojích daného typu. Tato data potom roztřídíme podle prostředí, ve kterém jsou stroje provozovány. Toho lze dosáhnout jen trpělivou mravenčí prací a s podporou provozovatele daného zařízení. Získávání informací je klíčovou otázkou spolehlivostních analýz. V nejlepší případě existuje softwarová databáze údržby, ze které je možné jednoduchým exportem potřebná data získat. Pokud ne, je třeba pátrat v listinných záznamech údržby a tyto následně převést do podoby elektronické. Nejhorším řešitelným případem je situace, kdy je historie údržby uložena pouze formou zkušeností zaměstnanců údržby zařízení. Potom je nezbytné zapsat údaje do přehledné tabulky za účelem opakovatelnosti a auditovatelnosti analýzy. Pokud není dostupná ani taková informace, nezbyvá než provést testování, zrychlené zkoušky apod., případně expertní odhad potřebných údajů. My však budeme předpokládat, že data jsou v nějaké podobě dostupná.

3.2 Výpočet doby provozu

Základním údajem pro výpočty spolehlivostních ukazatelů je celková kumulovaná doba provozu zkoumaného zařízení. Tu získáme jako prostý součet všech dob provozu zařízení. Pokud není dostupný údaj o datu uvedení do provozu, bude za počátek provozování považován okamžik první poruchy.

Pro výpočet motohodin jednotlivých strojů v MS Excel je možné použít funkci Rok360. Tato funkce počítá s rokem s pouze 30-ti denními měsíci, tedy s 360 dny za jeden kalendářní rok. Tento fakt částečně eliminuje skutečnost, že z důvodu vysoké náročnosti na vstupní informace není možné uvažovat plánované odstávky zařízení.

Celková kumulovaná doba provozu je prostým součtem dob, po kterou byla zařízení na pozicích, zatímco celková kumulovaná doba provozu, převedená na skutečný počet provozovaných strojů je odhadnutá skutečná doba provozu, tedy počet hodin, po které byly namontované provozované stroje na svých pozicích skutečně provozovány (bez doby, po kterou byly stroje na pozicích pouze jako záložní).

3.3 Výpočet spolehlivostních parametrů

Tato kapitola pojednává o poruchovosti technologických zařízení jako typu, tedy nikoliv podle jednotlivých kusů resp. výrobních čísel. Z dat o údržbových zásazích je třeba odfiltrovat záznamy o generálních a běžných opravách tak, aby zbyla pouze data o poruchách. Ta je třeba nejprve seřadit chronologicky a vytvořit histogram četnosti poruch podle jednotlivých let provozu. Počet poruch v jednom roce tedy udává počet poruch na všech provozovaných strojích.

Zařízení bývají provozována ve stále stejných provozních podmínkách po dlouhou dobu, proto by jejich intenzita poruch měla být konstantní. Tomuto předpokladu odpovídá exponenciální rozdělení střední doby do poruchy. Proto budeme testovat pouze oprávněnost nasazení exponenciálního rozdělení střední doby mezi poruchami a ukážeme, že případné nesrovnalosti je možné vysvětlit i jinak, než např. stárnutím zařízení. Exponenciální rozdělení má jediný parametr λ , který je převrácenou hodnotou střední doby mezi poruchami MTBF.

Provedeme test dobré shody chí-kvadrát pro potvrzení (vyvrácení) oprávněnosti použití exponenciálního rozdělení pro popis doby do poruchy. Protože exponenciální rozdělení má konstantní intenzitu poruch, lze zjistit očekávaný počet poruch v časovém intervalu A . Rozdělíme celkovou dobu testu na m stejných intervalů, kde očekávaný počet poruch A je:

$$A = w \cdot \frac{d}{T} \quad [1] \quad (1)$$

kde w je délka intervalu, která je zvolena tak, aby v každém intervalu bylo alespoň 5 poruch, d je počet poruch v testovaném intervalu. Vypočte se testová statistika

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(r_i - A)^2}{A} \quad [1] \quad (2)$$

Pro potvrzení hypotézy nasazení exponenciálního rozdělení pro popis střední doby do poruchy musí být vypočtená hodnota kvantilu χ^2 menší, než teoretická hodnota kvantilu $\chi^2(v)$ pro $v=m-1$ stupňů volnosti. Proveďte se jednostranný test na např. 10%¹ hladině významnosti.

Bodový odhad *MTBF* všech strojů (jednoho typu) se vypočte podle [2] bod 5.2:

$$MTBF = \frac{T}{r} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{r} \quad [h] \quad (3)$$

a intenzita poruch se potom pro exponenciální rozdělení vypočítá

$$\lambda = \frac{1}{MTBF} \quad [h^{-1}] \quad (4)$$

Konfidenční intervaly se získají dle normy [2] z odstavce 5.1.2.1 Dvoustranné konfidenční meze. Dolní mez je uvedena ve vzorci (5a), horní mez ve vzorci (5b).

$$\lambda_D = \frac{\chi_{0,05}^2(2r)}{2T} \quad [h^{-1}] \quad (5a)$$

$$\lambda_H = \frac{\chi_{0,95}^2(2r + 2)}{2T} \quad [h^{-1}] \quad (5b)$$

kde $\chi_{\alpha}^2(v)$ označuje α -kvantil distribuční funkce rozdělení χ^2 s v stupni volnosti.

$$MTBF_D = \frac{1}{\lambda_H} \quad [h] \quad (6a)$$

$$MTBF_H = \frac{1}{\lambda_D} \quad [h] \quad (6b)$$

¹ 10% hladina významnosti testování hypotézy označuje, že s 10% pravděpodobností nastane po přijetí hypotézy chyba 1. druhu, tedy že se nezjistí, zda je výběr z exponenciálního rozdělení, přestože z něho skutečně bude.

Dolní a horní mez střední doby mezi poruchami na 90% konfidenční mezi označuje, že s pravděpodobností 90% bude střední doba mezi poruchami ležet uvnitř intervalu $\langle MTBF_D, MTBF_H \rangle$.

Dalším sledovaným ukazatelem spolehlivosti je střední doba do obnovy (*MTTR*) funkce zařízení. Tu je možné spočítat jako podíl součtu všech časů do obnovy ku počtu poruch, pokud jsou tato data dostupná:

$$MTTR = \frac{T_p}{r} \quad [\text{h}] \quad (7)$$

Dolní a horní mez konfidenčního intervalu střední doby do obnovy se vypočítá:

$$MTTR_D = \frac{2T}{\chi_{0,95}^2(2r+2)} \quad [\text{h}] \quad (8a)$$

$$MTTR_H = \frac{2T}{\chi_{0,05}^2(2r)} \quad [\text{h}] \quad (8b)$$

Dolní a horní mez střední doby do obnovy na 90% konfidenční mezi udává, jaké je rozmezí dob do obnovy, které s 90% pravděpodobností spadnou do vypočteného intervalu.

Na základě znalosti těchto spolehlivostních parametrů je možné vypočítat asymptotickou pohotovost resp. nepohotovost technologického zařízení:

$$U = \frac{MTTR}{MTTR + MTBF} \quad [1] \quad (9)$$

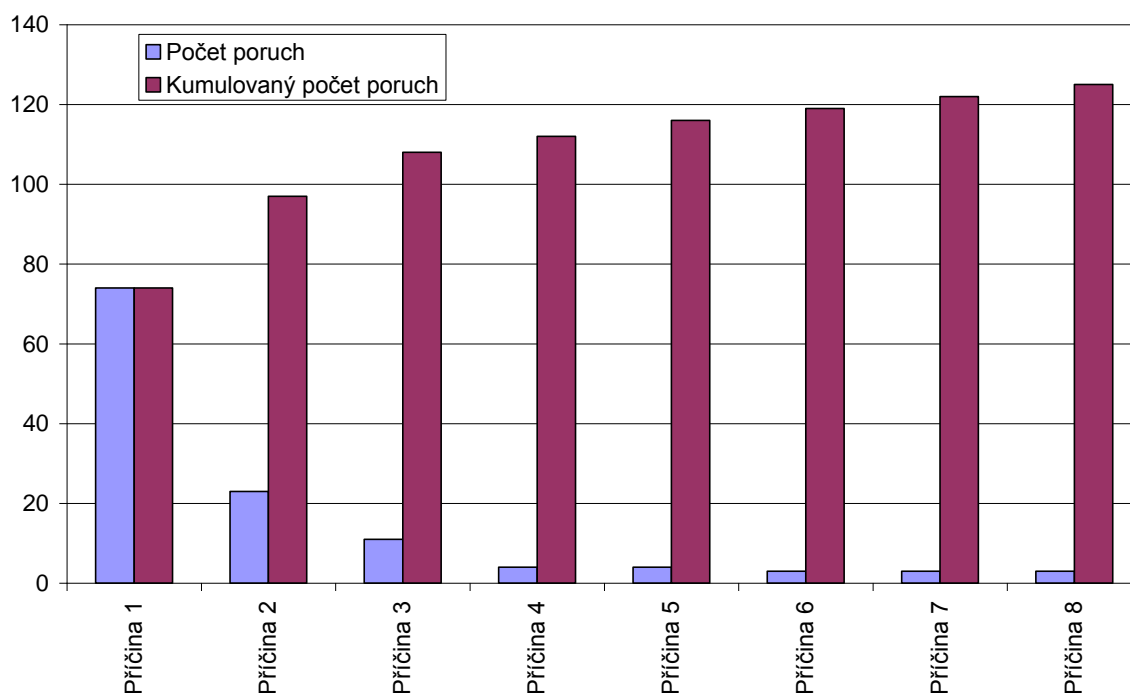
3.4 Paretova analýza příčin poruch

Pro odhalení nejčastěji se vyskytujících příčin poruch byla vyvinuta kvantitativní analýza příčin a následků, známá jako Paretova analýza. Umožňuje oddělit podstatné faktory od méně podstatných a ukázat, kam zaměřit úsilí při odstraňování nedostatků v procesu údržby zařízení. Tzv. Paretova analýza předpokládá, že přibližně 80% následků poruch je způsobeno pouze 20% příčin. Zdůrazňuje tedy fakt, že není nutné zabývat se všemi příčinami, nýbrž že pro dostatečný efekt stačí postihnout pouze nejdůležitější z nich. Pro účely této studie je vhodné vycházet ze zkušenosti provozovatele a řídit se jeho radami. Z těchto zkušeností lze předpovědět, které příčiny poruch jsou nejčtenější. Nejčtenější příčiny poruch mohou být dále roztrženy do podskupin, např. jak ukazuje následující tab. 1.

Tab. 1: Seznam nejčtenějších příčin poruch

Příčina poruchy	Celkem	Podpříčina 1	Podpříčina 2	Podpříčina 3	Podpříčina 4	Podpříčina 5
Příčina 1	74	27	23	22	2	
Příčina 2	11	5	3	3		
Příčina 3	23	9	5	5	2	2

V tabulce ovšem není vyčerpávající seznam poruch strojů. Je třeba rozpoznat všechny vzniklé poruchy a tyto zaznamenat, např. opět pomocí přehledné tabulky nebo pomocí Paretova diagramu, viz obr. 1.



Obr. 1: Paretův graf četnosti poruch

4. Výsledek studie

V závěru zprávy je vhodné shrnout dosažené výsledky, provozní podmínky, zkušenosti provozovatele, provedené úpravy na provozovaném zařízení, zdůraznit slabá místa analyzovaného stroje a případně navrhnout změnu konstrukce. Takováto studie by mohla a měla posloužit při návrhu nových zařízení podobných parametrů. Dalším uplatněním předkládaného postupu je jistě doložení spolehlivostních ukazatelů vyráběného (a predikce spolehlivostních parametrů vyvíjeného) zařízení, což je v současné době stále častější požadavek odběratele.

Literatura

- [1] ČSN IEC 50(191) (010102) Mezinárodní elektrotechnický slovník - kapitola 191: Spolehlivost a jakost služeb.
- [2] 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.

Poděkování

Tato práce byla vytvořena s finanční podporou Ministerstva dopravy České republiky, projekt číslo 1M06059 - Progresivní technologie a systémy pro energetiku.

Příloha 1: Praktické zkušenosti

Zkušenosti se sběrem dat

Předložený návod provádění analýzy technologického zařízení byl aplikován na velkých průmyslových čerpadlech firmy Sigma Group, a.s., používaných v energetice v ČR. Prvním krokem analýzy je sběr dostupných dat. Nejprve byla zkoumána myšlenka, že data jsou sbírána centrálně. Bylo kontaktováno několik firem, zabývajících se údržbou čerpadel. Výsledkem bylo získání rozsáhlých tabulek, jejichž ukázka je uvedena v Tab. 1.

Tab. 1: Výpis z centrální databáze poruchovosti čerpadel

BEZNE_CP	ELNA	HTC	DZ	DUSLEDEK	PRICINA	ZAKL_KOD_ZAR	DOPLN_KOD	KOD_SKR	STAV	MWH	GJ	DOBA
290	ECH	B3	1.7.1982 9:27	RS20	90	4320	4900	312	2	55	0	0
317	ECH	B3	9.7.1982 17:16	RE10	61	2222	4900	314	2	120	0	0,6
322	ECH	B4	15.7.1982 15:31	RH10	61	4320	4600	311	2	162	0	0,9
339	ECH	B2	23.7.1982 10:25	RS20	64	2222	4900	312	2	12	0	0
357	ECH	B4	30.7.1982 22:35	RE11	64	4320	4600	311	2	260	0	1,3
360	ECH	B2	31.7.1982 11:24	RE11	61	2222	4900	314	2	600	0	3

Jak vidno, data je možné filtrovat podle umístění čerpadel na elektrárnách, viz sloupec ELNA (zde elektrárna Chvaletice - ECH), podle ZAKL_KOD_ZAR je možné určit, zda se jedná o čerpadlo napájecí, kondenzátní nebo chladicí, podle sloupce DZ lze dohledat datum nastoupení poruchy a je možné určit dobu trvání poruchy ze sloupce DOBA. Bohužel nelze zjistit, o který konkrétní stroj se jedná, navíc pokud je na elektrárně provozováno např. více typů kondenzátních čerpadel, není možné zjistit, kterého typu se porucha týká. Z těchto důvodů musí být data získávána náročnějším, ovšem přesnějším způsobem a to přímo od provozovatelů zařízení, od jednotlivých elektráren. Relevantní údaje jsou zálohovány na oddělení Správy hmotného majetku jednotlivých elektráren. Zde jsou také shromážděny zkušenosti z mnohaletého provozu analyzovaných zařízení. Příklad takových dat je uveden v tabulce 4. Některé sloupce jsou z důvodu omezené velikosti stránky vynechány.

Tab. 2: Seznam údržbových zásahů získaných od provozovatele

Popis	Pr.systém	Divize	Typ zař.	Zařízení	Datum	Hodiny	Požadované datum
1VC01D001-VÝMĚNA VADNÉHO RELÉ EZH-112V-T 1VC01L051	SOVP	SO	CER	1VC01D001	17.4.2000	200	17.12.1999
1VC01D001- VYČISTIT TĚLESO ČERPADLA OD OLEJE	SOVP	SO	CER	1VC01D001	4.10.2000	12	12.6.2000
1VC01D001 - ODSTRANĚNÍ NETĚSNOSTI LOŽISKA ČERPADLA	SOVP	SO	CER	1VC01D001	16.10.2000	24	11.7.2000
1VC01D001, GDZ/485/00 -PROVEĎTE ZMĚŘENÍ ROZBĚHU MOTORU	SOVP	SO	CER	1VC01D001	23.11.2000	20	11.8.2000

Na elektrárnách v ČR neexistuje jednotný formát uchovávání dat o provozu zařízení. Z tohoto důvodu je nutné získaná data převést do standardizované podoby. Pro účely analýzy je dostačující, aby tabulka obsahovala údaje o jednoznačné identifikaci stroje (výrobní číslo, číslo pozice), popis poruchy a datum poruchy. Pro výpočet nepohotovosti čerpadla je nutná informace o počtu hodin opravy, ovšem ta je často nedostupná. Následující tabulka předkládá vzor takto upravených dat.

Tab. 3: Upravená, chronologicky seříděná data o poruchách

Výrobní číslo	Datum opravy	Popis opravy	Počet hodin opravy
1VC01D001	17.04.00	Výměna vadného relé EZH-112VT 1VC01L051	200
1VC01D001	04.10.00	Vyčistit těleso čerpadla od oleje	12
1VC01D001	16.10.00	Odstranění netěsnosti ložiska čerpadla	24
1VC01D001	23.11.00	Provedte změření rozběhu motoru	20
1VC01D001	19.03.01	Kontrola olejového relé	8
1VC01D001	30.04.01	Přetěsnění děl. roviny rad. ložiska čerpadla	108
1VC01D001	30.04.01	Odpojení měřidel čerpadla	6

Z upravených dat již je možné přistoupit k vlastní analýze, která je popsána v následujících odstavcích.

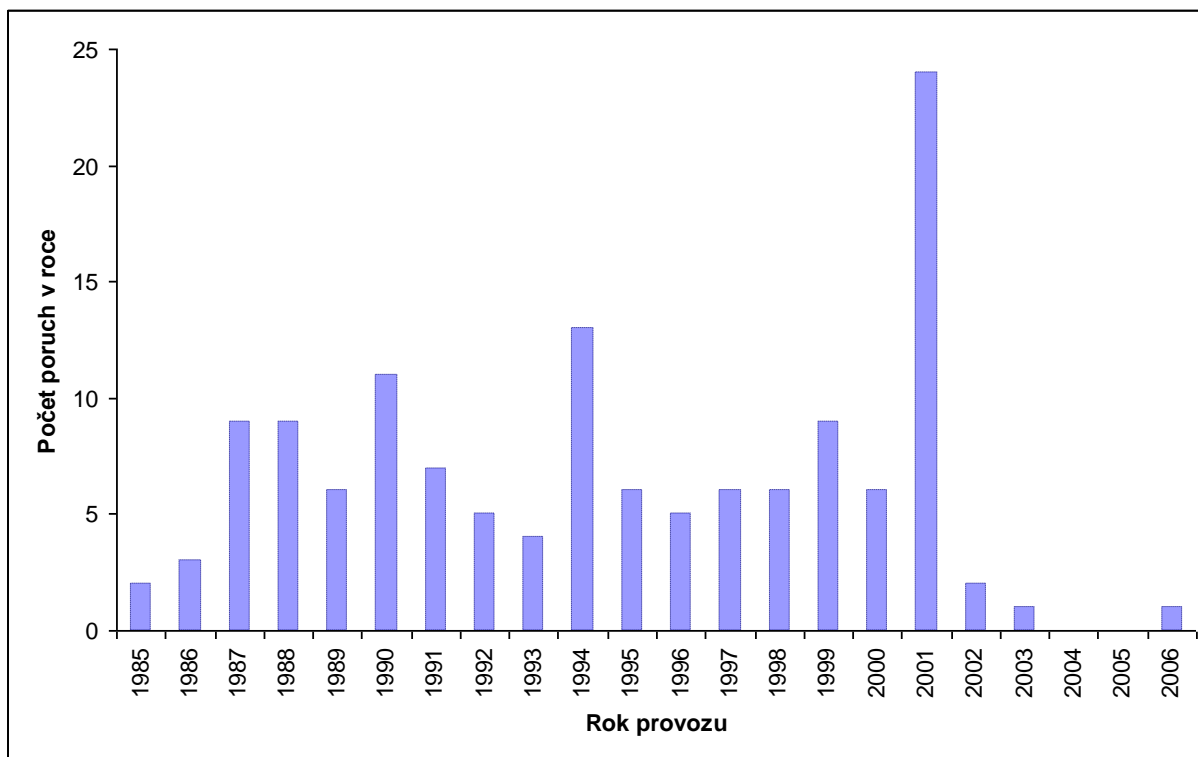
Výpočet spolehlivostních parametrů

Kumulovaná doba provozu je vypočtena a uvedena v následující tabulce. V uvedeném příkladě jsou údaje „Celková kumulovaná doba provozu“ a „Celková kumulovaná doba provozu převedená na skutečný počet provozovaných strojů“ totožné, neboť všechny stroje byly v provozu po celou dobu jejich setrvání na pozici.

Tab. 4: Doby provozu jednotlivých kusů strojů

Identifikační číslo	Datum uvedení do provozu	Odhadovaná doba provozu [h]
elna1_blok1_stroj1	3.8.1985	184 248
elna1_blok1_stroj2	18.12.1986	172 368
elna1_blok1_stroj3	15.2.1990	145 080
elna1_blok1_stroj4	25.4.1986	177 960
elna1_blok2_stroj1	18.9.1987	165 888
elna1_blok2_stroj2	6.4.1988	161 136
elna1_blok2_stroj3	25.9.1987	165 720
elna1_blok2_stroj4	17.8.1987	166 632
Celková kumulovaná doba provozu		1 339 032
Celkový počet poruch		135

Počet poruch v jednotlivých letech je možné zapisovat v tabulkové podobě, ovšem přehlednější je forma grafu, ze které jsou ihned vidět trendy poruchovosti. Příklad histogramu četnosti poruch v jednotlivých letech provozu je uveden na následujícím obrázku.



Obr. 1: Počet poruch v jednotlivých letech provozu zařízení

Z uvedeného obrázku je zřejmé, že proud poruch byl relativně stejný po celou dobu testu, pouze v roce 2001 došlo k výraznému vzrůstu počtu poruch. Při hledání příčin poruch tedy zaměříme pozornost na tento rok. V uvedeném případě se jednalo o pokus změnit stávající systém ucpávky, což se projevilo jako zvýšený počet údržbových zásahů. V letech následujících po této modifikaci již docházelo k nápadně nižšímu počtu poruch, tedy je zřejmé, že úprava ucpávkového systému dosáhla snížení poruchovosti čerpadel.

Vzhledem k tomu, že v roce 2001 bylo 24 poruch, zatímco v letech následujících jejich počet prudce klesl, budeme předpoklad exponenciálního rozdělení pro popis střední doby do poruchy čerpadla testovat pouze na prvním časovém období. Doba testu tedy byla 16 let, celkem se za tuto dobu stalo 107 poruch a délka intervalu byla stanovena na 2 roky. Očekávaný počet poruch v každém intervalu podle (1) je:

$$A = 2 \cdot \frac{107}{16} = 13$$

Hodnota testového kritéria podle (2):

$$\chi^2 = 9,71$$

Hodnota χ^2 je 9,71, teoretická hodnota $\chi^2_{0,9}(7)$ je rovna 12,02. Hypotéza předpokladu exponenciálního rozdělení pro popis střední doby do poruchy čerpadla je na hladině významnosti 10% potvrzena pro období 1985-2000. V roce 2001 bylo provedeno větší množství údržbových zásahů, které snížily poruchovost strojů v následujících letech.

Bodový odhad střední doby mezi poruchami *MTBF* se vypočte podle (3):

$$MTBF = \frac{1339032}{135} [h] = 9900h$$

Intenzita poruch podle (4) je:

$$\lambda = 1 \cdot 10^{-4} h^{-1}$$

Konfidenční intervaly intenzity poruch se získají dle (5a), resp. (5b).

$$\lambda_D = \frac{232,95}{2 \cdot 1339032} [h^{-1}] = 8,7 \cdot 10^{-5} h^{-1}$$

$$\lambda_H = \frac{311,5}{2 \cdot 1339032} [h^{-1}] = 1,2 \cdot 10^{-4} h^{-1}$$

Konfidenční intervaly střední doby mezi poruchami se vypočte dle (6a), resp. (6b):

$$MTBF_D = \frac{2 \cdot 1339032}{311,5} [h] = 8600h$$

$$MTBF_H = \frac{2 \cdot 1339032}{232,95} [h] = 11500h$$

Střední doba do obnovy je spočtena podle (7):

$$MTTR = \frac{3270}{135} [h] = 24h$$

Konfidenční meze střední doby do obnovy jsou dopočítány podle (8a), resp. (8b):

$$MTTR_D = \frac{2 \cdot 3270}{311,5} [h] = 21h$$

$$MTTR_H = \frac{2 \cdot 3270}{232,95} [h] = 28h$$

Nyní již zbývá pouze dopočítat asymptotickou nepohotovost zařízení podle (9):

$$U = \frac{24,2}{24,2 + 9919} = 2,4 \cdot 10^{-3}$$

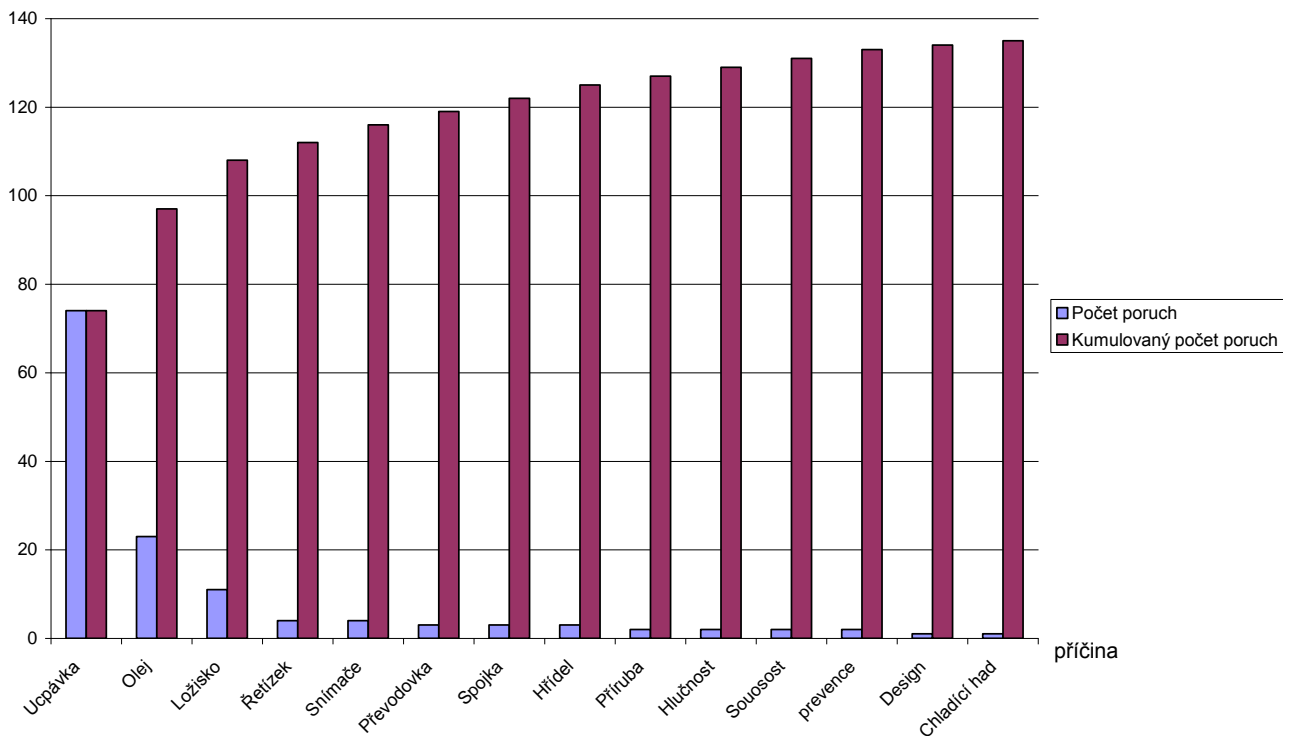
Paretova analýza

Zkušenosti provozovatele ukazují, že mezi nejčetnější poruchy čerpadel patří porucha ucpávkového systému, porucha olejového hospodářství a porucha ložiska. Proto byly tyto typy příčin poruch ještě dále rozděleny do kořenových příčin. Toto dělení je zobrazeno v tabulce 5.

Tab. 5: Příklad vybraných nejčetnějších příčin poruch čerpadla

Příčina poruchy	Celkem	Seřízení ucpávky	Výměna ucpávky	Doplnění ucp. hmoty	Odpad od ucpávky	Vyčištění ucpávky	
Porucha ucpávky	74	27	23	22	1	1	
	Celkem	Přetěsnění	Vadné chlazení	Revize	Odvzdušnění	Výměna oleje	
Porucha ložiska	11	5	2	2	1	1	
	Celkem	Přetěsnění	Dolítí	Netěsné víko	Potíže s odběry	Montáž "O" kroužku	Výměna chlad. hadu
Porucha na oleji	23	9	5	5	2	1	1

Tři dominantní módy poruch pokryly skutečně 80% všech příčin poruch (jedná se o neupravený příklad, založený na reálných datech) - 108 ze 135 poruch. Počet poruch jedné příčiny a celkový kumulovaný počet poruch příčin, řazených podle četnosti, udává následující Paretův graf.



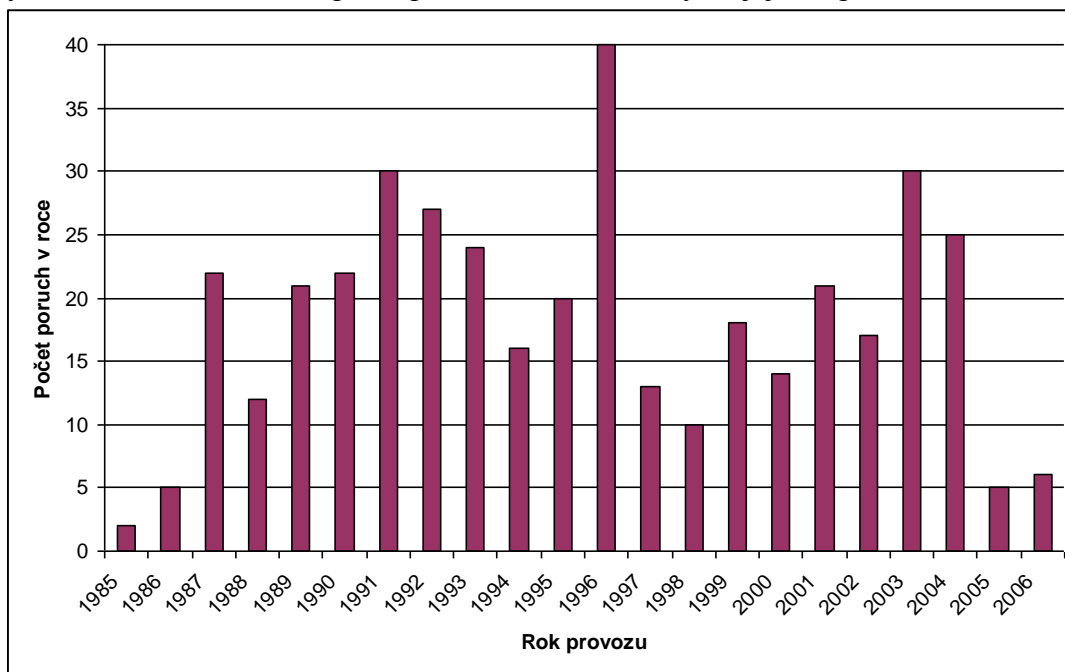
Obr. 2: Paretův graf četnosti módů poruch

Výsledky Paretovy analýzy ukazují, že nejproblémovějším místem v historii provozování čerpadla byl ucpávkový systém. Vzhledem k tomu, že v roce 2001 došlo k úpravě ucpávky, doporučuje se zaměřit pozornost na druhou nejčetnější poruchu, a sice poruchu olejového hospodářství a zároveň pozorně sledovat poruchovost modernizovaného ucpávkového systému.

Co lze vyčíst z výsledků

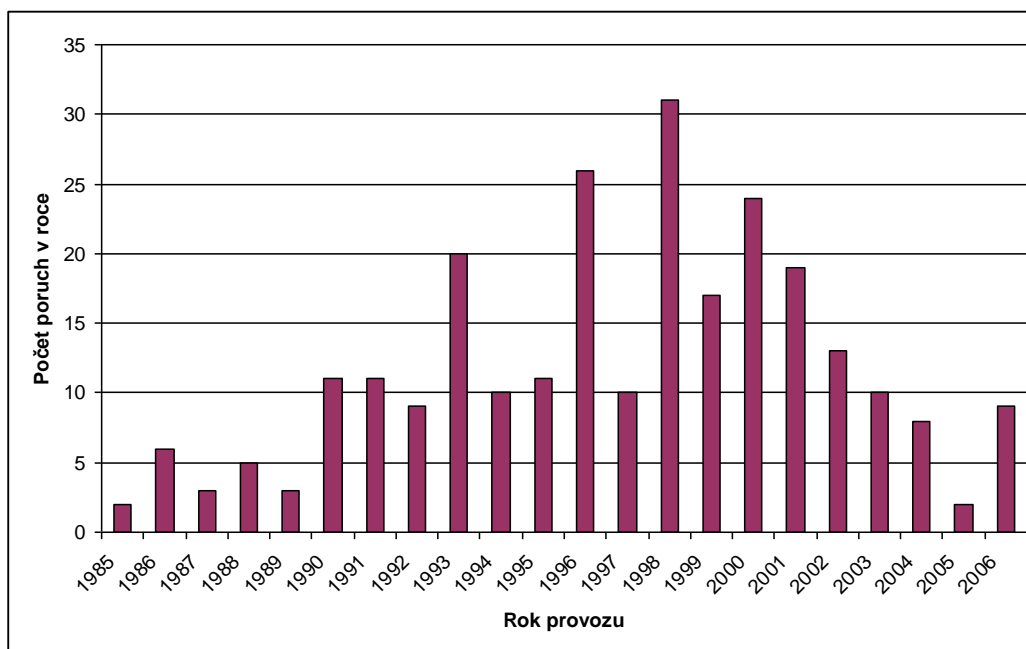
Na následujících řádcích bude uvedeno několik příkladů dosažených výsledků, vždy s doprovodným komentářem. Tak např. Obr. 3 ukazuje histogram četnosti poruch po letech. Nápadný je počet poruch v roce 1996, je totiž o 10 poruch vyšší, než druhá nejvyšší hodnota. Nejprve je třeba překontrolovat vstupní data. Sledujeme, zda je na poruchy pohlíženo se stejnou přísností, tedy zda to, co v jiných letech nebylo za poruchu považováno, není náhodou v "podezřelém" roce do statistiky započítáno. To je analytik schopen provést sám. Bohužel (bohudík?) v tomto případě si módy poruch odpovídaly. Bylo tedy přistoupeno k hledání odpovědi za pomoci operátora údržby, který si vzpomněl, že skutečně v roce 1996 došlo k několikanásobné výměně oleje, způsobené jeho nadměrným černáním. Pikantní na této skutečnosti je to, že nikdy nebyla zjištěna příčina tohoto černání, ovšem nepříznivý jev byl odstraněn změnou výrobce oleje.

Další nesrovnalostí v jinak konstantním průběhu počtu poruch jsou poslední roky provozování čerpadla - 2005 a 2006. Nepředchází jim zvýšený počet údržbových zásahů, tedy zřejmě neproběhla rozsáhlejší rekonstrukce čerpadla, přesto roční počet poruch rapidně klesl. Důvod byl opět nalezen po konzultaci se zaměstnancem údržby čerpadla a byla jím změna politiky údržby. Doposud byl totiž stroj udržován tak, aby vyčleněné peníze byly spotřebovány. Ovšem se vzrůstající oblíbeností údržby na základě stavu zařízení bylo k tomuto typu údržby přistoupeno i zde a výsledek se dostavil, klesl počet poruch a tím i náklady na jejich opravu.



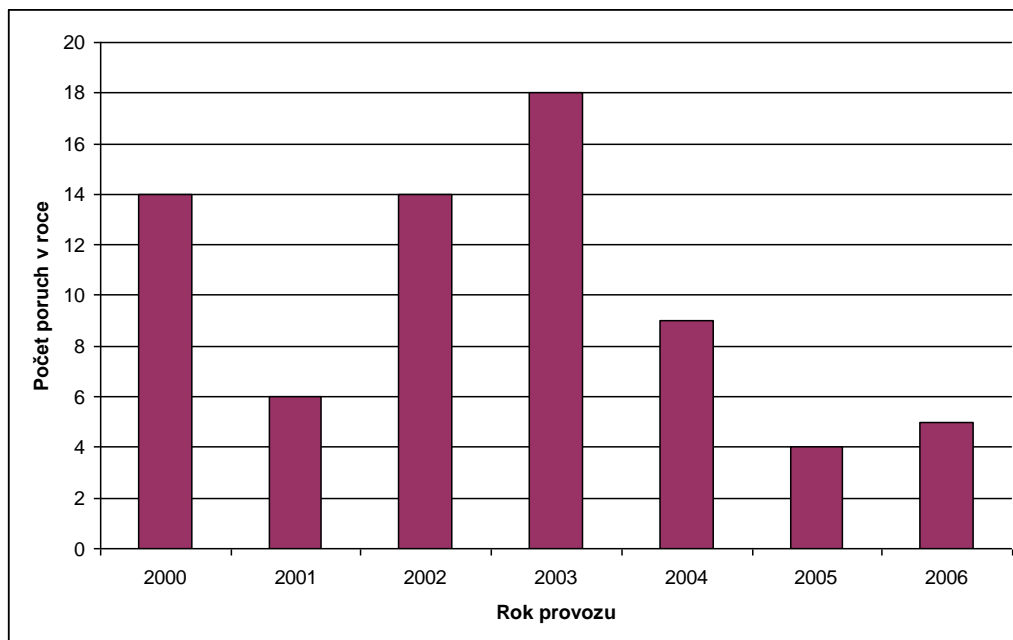
Obr. 3: Počet poruch v jednotlivých letech provozování - příklad 1

Dalším příkladem, kdy správná interpretace výsledku usnadní hledání kritických míst zkoumaného zařízení, je Obr. 4, resp. analýza, jejíž je součástí. Na tomto obrázku je zřetelně vidět nárůst počtu poruch do roku 1998. Je způsoben opakovaně se objevující poruchou ucpávky, která byla výrobcem dodána jako měkká. V roce 1998 proběhl pokus o její modernizaci, ovšem ukázalo se, že konfigurace stroje není vhodná pro změnu ucpávky a i nadále byl zachován stávající ucpávkový systém.



Obr. 4: Počet poruch v jednotlivých letech provozování - příklad 2

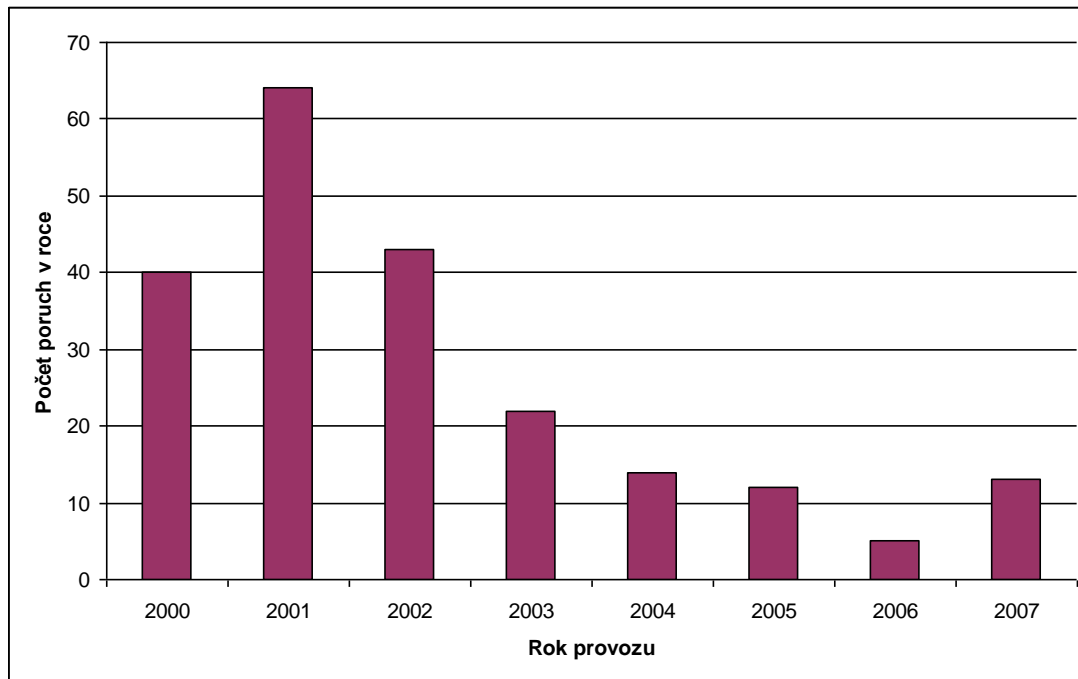
Jako další příklad je uveden problém tvrdnoucích ucpávek. Na Obr. 5 je vidět, že počet poruch se cyklicky mění ve tříleté periodě, což je dáno právě životností ucpávek. V roce 2003 proběhla jejich výměna, což mělo za následek snížení počtu poruch v následujících letech.



Obr. 5: Počet poruch v jednotlivých letech provozování - příklad 3

Jako poslední příklad je uveden graf na Obr. 6. Po prvotní velmi vysoké poruchovosti ucpávkového systému došlo ke změně politiky údržby z pevně časově plánované na údržbu na

základě stavu. Tato změna probíhala “opatrně“, takže její dopad je rozložen do více let, ovšem je zřejmé, že úspěch v podobě snížení počtu údržbových zásahů se dostavil.



Obr. 6: Počet poruch v jednotlivých letech provozování - příklad 4

MODEL SPOLEHLIVOSTI KOMPRESOROVÉ STANICE TRANZITNÍHO PLYNOVODU

*Ing. Josef Chudoba, Ústav řízení systémů a spolehlivosti, Technická univerzita v Liberci,
josef.chudoba@tul.cz*

1. Úvod

K vytvoření dynamického modelu spolehlivosti kompresorové stanice bude využito metody markovských procesů a řetězců. Výsledkem markovských procesů není jako u ostatních metod (RBD,FTA) asymptotická pohotovost systému, ale funkce okamžité pohotovosti $A(t)$ v čase. Tím, že je známa pohotovost systému v čase, lze účinně zlepšovat provozuschopnost systému vhodnou údržbou.

Metoda markovských procesů je v praxi pouze velmi výjimečně používána, protože příprava přechodového diagramu je mnohem složitější než příprava stromu poruchových stavů FTA nebo blokových diagramů bezporuchovosti RBD. Kvalitní markovská analýza právě využívá jako základ výstupy z metody FTA a RBD.

Protože kompresorová stanice je velmi složitě a silně zálohované zařízení, bude v tomto příspěvku rozšířeno běžné používání metody markovských procesů o modelování:

- údržbových zásahů (periodická údržba),
- komponent s neexponenciální dobou do poruchy,
- výkonových konfigurací systému.

Model kompresorové stanice bude dynamický ze dvou pohledů - časového a výkonového. Z pohledu časového bude získána funkce okamžité pohotovosti $A(t)$, z pohledu výkonového bude spolehlivost kompresorové stanice modelována pro různý objem přepravovaného plynu.

Výsledkem úloh je odhad funkce okamžité pohotovosti $A(t)$ v čase. Vlivem údržbových zásahů a dále tím, že doba do poruchy/opravy zařízení nelze často popsat pomocí exponenciálního rozdělení dochází k neexistenci asymptotické pohotovosti A . Z funkce okamžité pohotovosti $A(t)$ lze zjistit součinitel střední pohotovosti $\overline{A(t_1, t_2)}$. Pomocí střední pohotovosti lze zjistit, zda systém splňuje/nesplňuje technické, technologické a ekonomické parametry provozu. Pomocí grafu $A(t)$ lze například:

- plánovat periodickou údržbu systému,
- zvyšovat pohotovost zařízení,
- popisovat degradaci komponent a systému,
- odhadnout čas, při kterém zařízení začne dosahovat nižší než předepsané pohotovosti,
- vytvářet ekonomické modely finančních zisků a ztrát z provozu/poruch/údržby zařízení.

2. Analýza systému

2.1 Popis systému

Z RWE Transgas byla získána mapa tranzitního plynovodu ČR, na které jsou zobrazeny nejdůležitější objekty pro přepravu plynu. Nejdůležitějšími objekty jsou: kompresorové stanice, předávací stanice, trasové uzávěry a potrubní linie.

Dále byl získán k celému zařízení RWE Transgas soupis majetku. Soupis majetku je tvořen seznamem technických míst. Ke každému technickému místu je uvedeno jeho označení, podle kterého je ho možné nalézt na mapě, název a slovní popis.

Příspěvek se v aplikačním příkladě zabývá modelováním spolehlivosti kompresorové stanice plynovodu včetně příslušných vstupních/výstupních linií. Nejdůležitější a zároveň nejvytíženější potrubní linie na území ČR vedou:

- z Lanžhota (ČR/SR) do Rozvadova (ČR/SRN),
- z Lanžhota (ČR/SR) do Hory Svaté Kateřiny (ČR/SRN).

Na těchto nejdůležitějších plynovodech je 6 kompresorových stanic, které jsou technologicky podobné a i množstvím přepraveného plynu srovnatelné. Kompresorové stanice jsou umístěny po více než 100 km. Linie mezi kompresorovými stanicemi jsou tvořeny třemi potrubími o různé světlosti. Mezi kompresorovými stanicemi jsou přibližně po 20 km trasové uzávěry.

Pro vytvoření matematicko-spolehlivostního modelu je zvolena kompresorová stanice a potrubní linie na vstupu a na výstupu z kompresorovny. Byla vybrána kompresorová stanice KS 26 Kouřim.

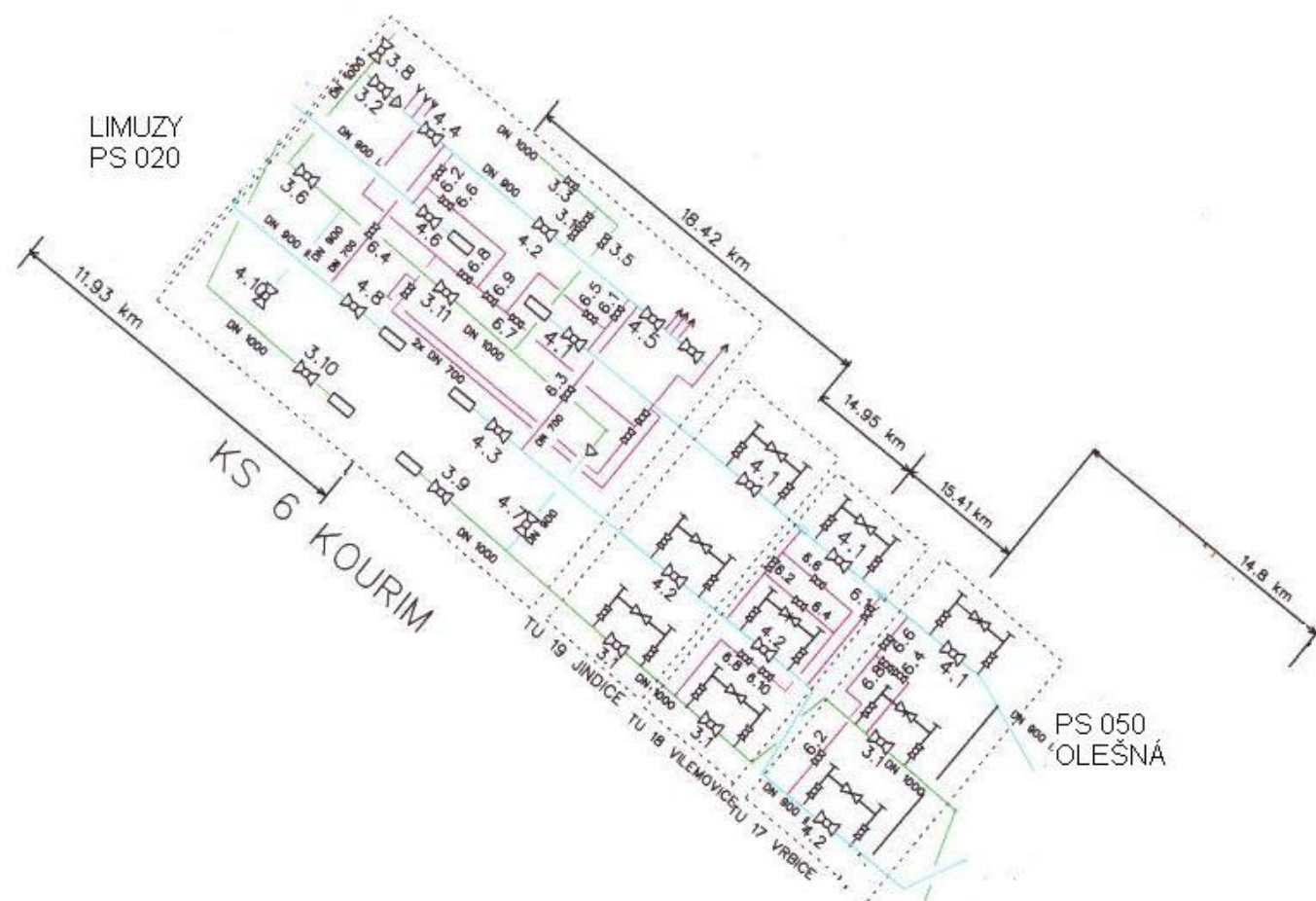
Potrubní linie jsou modelovány od výstupu předávací stanice PS 050 Olešná ke vstupu k předávací stanici PS 020 Limuzy. Délka potrubních linií sledovaných úseků je 75,5 km a jsou na nich 3 trasové uzávěry. Celý sledovaný úsek je tvořen 3 liniemi potrubí o světlosti DN 900, DN 900 a DN 1000. Kompresorová stanice je tvořena sedmi shodnými turbosoustrojími. Obr. 1.

2.2 Funkční, degradovaný a nefunkční stav systému

Funkční stav předpokládá, že všechny turbokompresory a všechny vstupní/výstupní linie jsou v provozu a jejich funkčnost by neměla být snížena.

Degradovaný stav předpokládá, že existuje porucha některého z turbokompresorů nebo některé vstupní/výstupní linie. Jakákoliv porucha však nemá vliv na zákazníka. Zákazník obdrží smlouvené množství plynu v daném čase a odpovídající kvality.

Nefunkční stav předpokládá, že existuje porucha některého z turbokompresorů nebo některé vstupní/výstupní linie. Porucha nebo poruchy jsou natolik závažné, že mají vliv na zákazníka. Zákazník neobdrží smlouvené množství plynu v daném čase nebo v odpovídající kvalitě.



Obr. 1: Modelovaný úsek kompressorové stanice Kourim a přilehlých potrubních linií

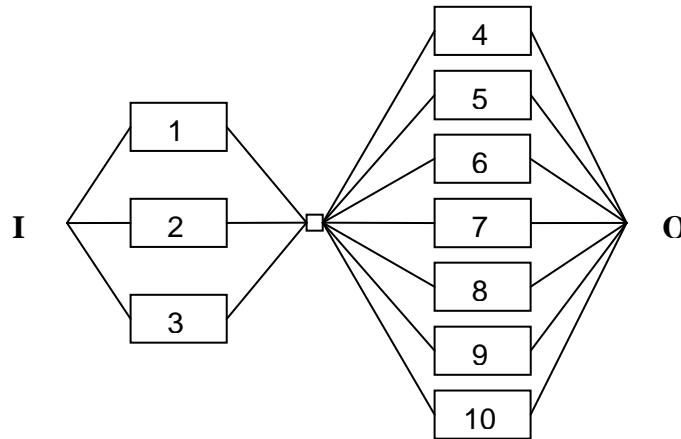
2.3 Logický blokový diagram systému

Systém se popíše pomocí logického blokového diagramu (LBD). LBD je základem pro metodu blokových diagramů bezporuchovosti (RBD). Metoda LBD je grafickým modelem systému, kde jednotlivé prvky systému jsou znázorněny obdélníky - bloky a logické vazby mezi jednotlivými prvky jsou znázorněny hranami, které mohou být orientované nebo neorientované. Vstupní brána do systému je označena I (input), výstupní brána O (output). Prvky mezi nimi jsou uspořádány a propojeny tak, aby logicky reprezentovaly všechny „úspěšné cesty“ systému.

Modelová úloha má zjednodušený LBD diagram, který je zobrazen na obr. 2. Popis všech bloků upraveného diagramu je následující:

- linie 1 na vstupu nebo na výstupu, v LBD diagramu označeno 1
- linie 2 na vstupu nebo na výstupu, 2
- linie 3 na vstupu nebo na výstupu, 3
- turbokompresor 1, 4
- turbokompresor 2, 5

- turbokompresor 3, 6
- turbokompresor 4, 7
- turbokompresor 5, 8
- turbokompresor 6, 9
- turbokompresor 7, 10



Obr. 2: Logický blokový diagram (LBD) modelové úlohy

2.4 Výkonové konfigurace modelové úlohy

Tranzitní plynovod, obdobně jako jiné přepravní sítě, nepřevádí po celý rok maximální množství plynu. Podle množství přepravovaného plynu se zapínají a vypínají jednotlivé potrubní linie a kompresory. Při dlouhodobě nižších požadavcích na přepravu (například v létě) se provádí předepsaná údržba systému.

Při malém množství přepravovaného plynu bude jiný model spolehlivosti, než při maximálním přepravovaném množství. V prvním případě při poruše turbokompresoru se použije turbokompresor v pohotovostní záloze. Kompresor je sice porouchán, ale objem přepraveného plynu nebude omezen. Na druhou stranu při přepravě maximálního množství plynu, když dojde k poruše turbokompresoru, může dojít ke stavu, kdy systém nebude schopen přepravit objednané množství plynu.

Na modelovém systému je popsáno 10 scénářů - základních výkonových konfigurací:

1. scénář: v provozu je potřebná jedna linie na vstupu/výstupu a jeden turbokompresor,
2. scénář: v provozu je potřebná jedna linie na vstupu/výstupu a dva turbokompresory,
3. scénář: v provozu jsou potřebné dvě linie na vstupu/výstupu a dva turbokompresory,
4. scénář: v provozu jsou potřebné dvě linie na vstupu/výstupu a tři turbokompresory,
5. scénář: v provozu jsou potřebné dvě linie na vstupu/výstupu a čtyři turbokompresory,
6. scénář: v provozu jsou potřebné tři linie na vstupu/výstupu a tři turbokompresory,
7. scénář: v provozu jsou potřebné tři linie na vstupu/výstupu a čtyři turbokompresory,

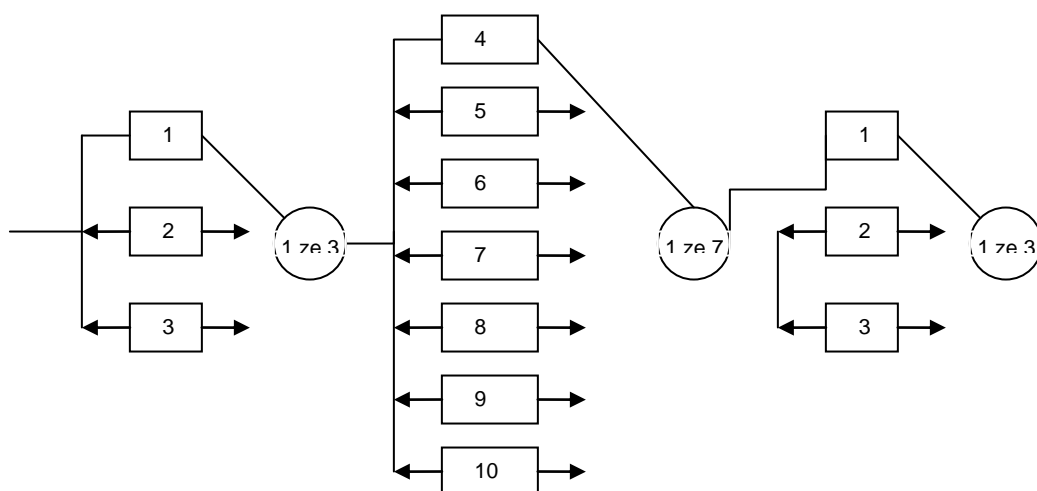
8. scénář: v provozu jsou potřebné tři linie na vstupu/výstupu a pět turbokompresorů,
9. scénář: v provozu jsou potřebné tři linie na vstupu/výstupu a šest turbokompresorů,
10. scénář: v provozu jsou potřebné tři linie na vstupu/výstupu a sedm turbokompresorů.

2.5 Blokový diagram bezporuchovosti výkonových konfigurací

Předkládaný model předpokládá 10 výkonových konfigurací kompresorové stanice tranzitního plynovodu. Konfigurace jsou označeny čísly 1, 2, ..., 10, viz obr. 3 až 12.

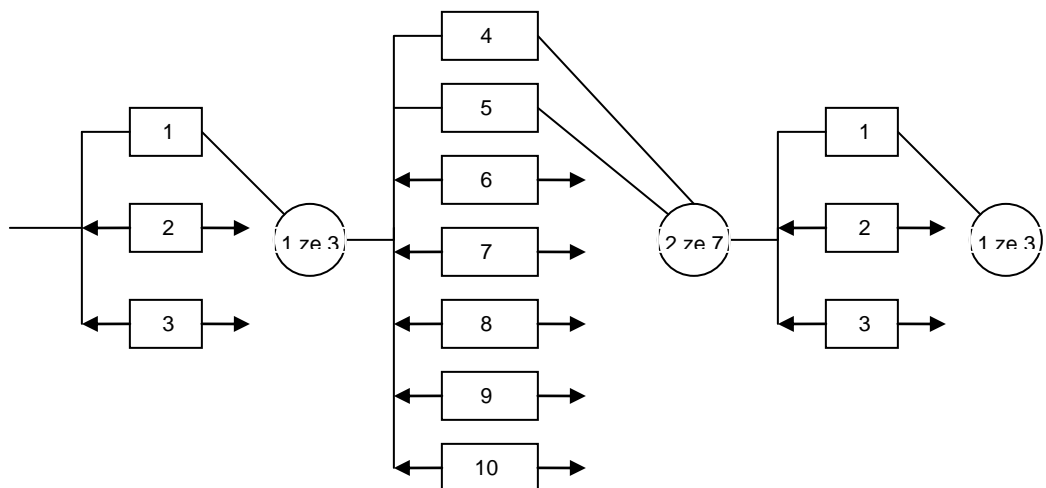
Veškeré linie a trasové uzávěry se budou nazývat výrazem „linie“. V blokových diagramech jsou zobrazeny pod označením 1 až 3. V modelové úloze obsahuje kompresorovna 7 turbokompresorů, které jsou označeny 4 až 10. Linie se rozdělují na vstupní a výstupní.

Například konfigurace 1 označuje stav, ve kterém jsou požadavky na transfer plynu minimální. V tomto výkonovém stavu stačí pro bezporuchový provoz kompresorové stanice pouze činnost jedné vstupní linie, jednoho turbokompresoru a jedné výstupní linie, viz obr. 3.

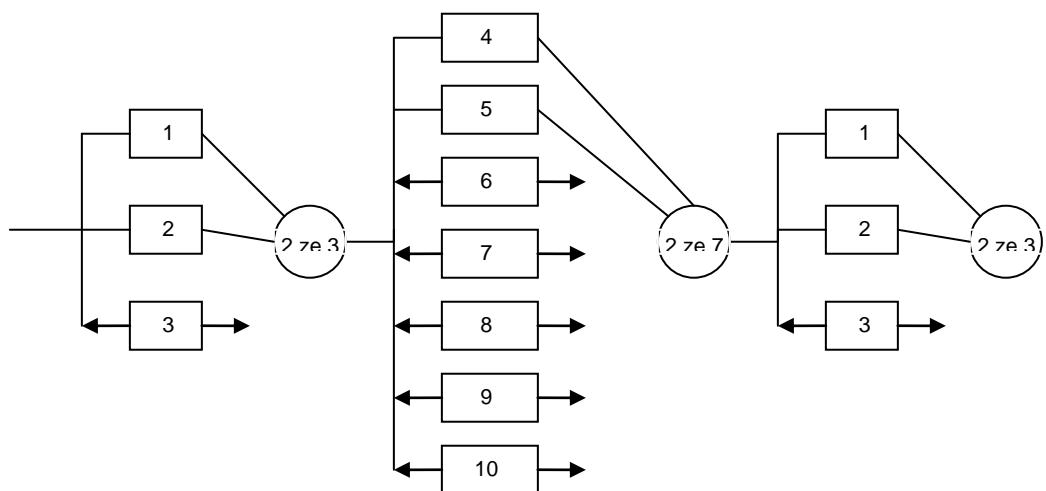


Obr. 3: Blokový diagram bezporuchovosti kompresorové stanice pro konfiguraci č. 1

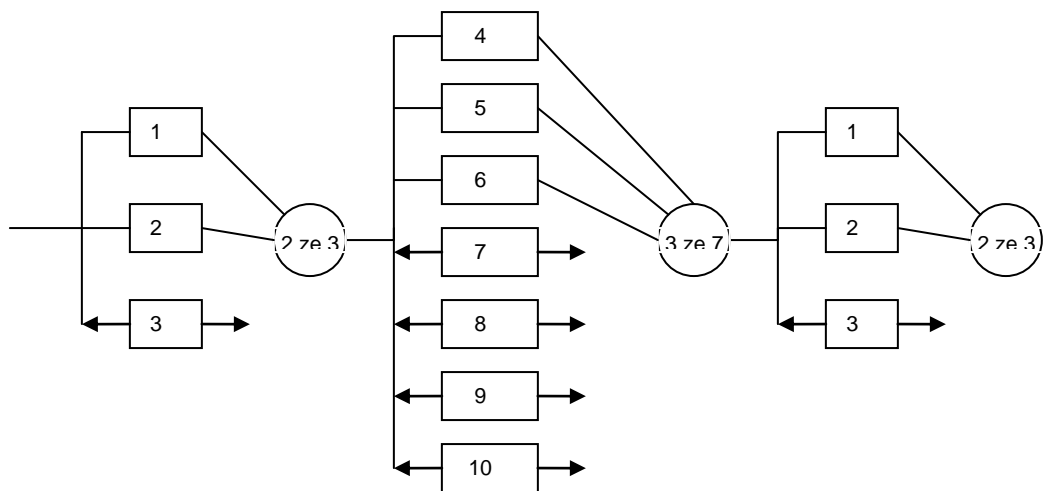
Blokový diagram bezporuchovosti (RBD reliability block diagram) kompresorové stanice pro konfiguraci č. 1 - v provozu jedna linie na vstupu a výstupu a v provozu jeden turbokompresor. Šipky označují pohotovostní zálohu. V případě poruchy zařízení s pohotovostní zálohou se přepne zařízení a nahradí tím zařízením s poruchou. Označení „1 ze 3“ znamená, že pro splnění funkce systému je potřeba alespoň jedno zařízení v provozuschopném stavu. Model předpokládá, že komponenta naběhne okamžitě a vždy.



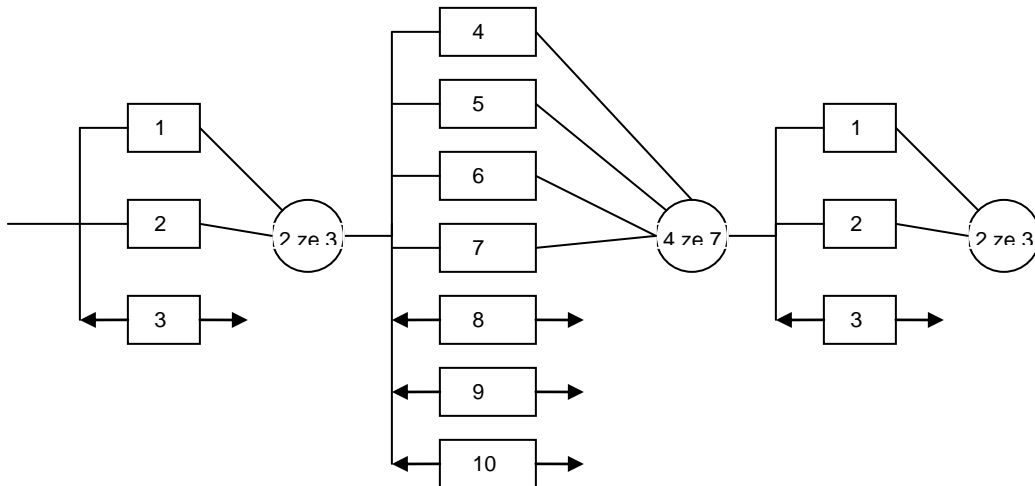
Obr. 4: Blokový diagram bezporuchovosti kompresorové stanice pro konfiguraci č. 2



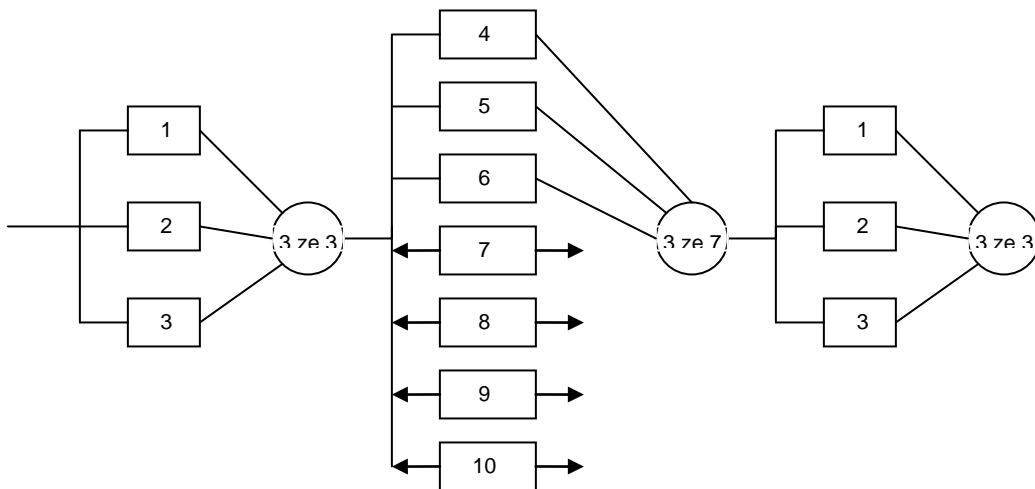
Obr. 5: Blokový diagram bezporuchovosti kompresorové stanice pro konfiguraci č. 3



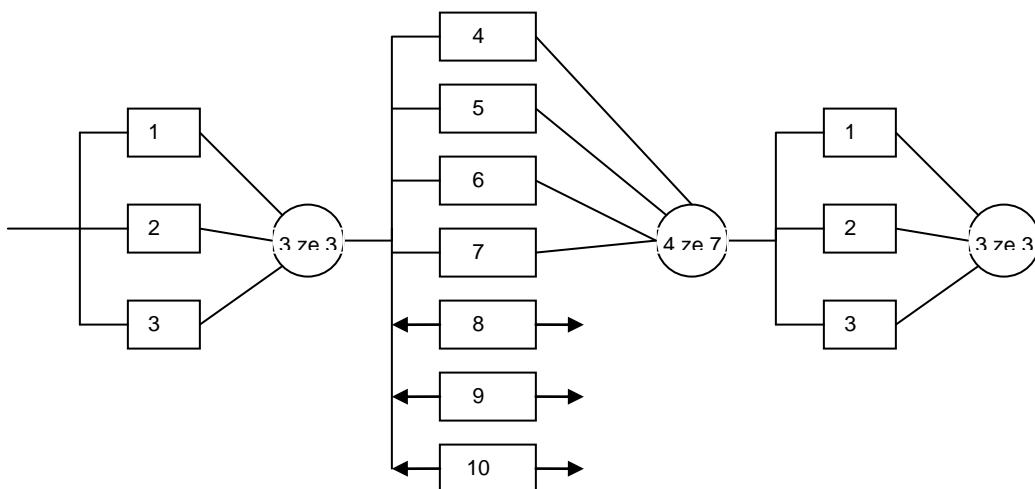
Obr. 6: Blokový diagram bezporuchovosti kompresorové stanice pro konfiguraci č. 4



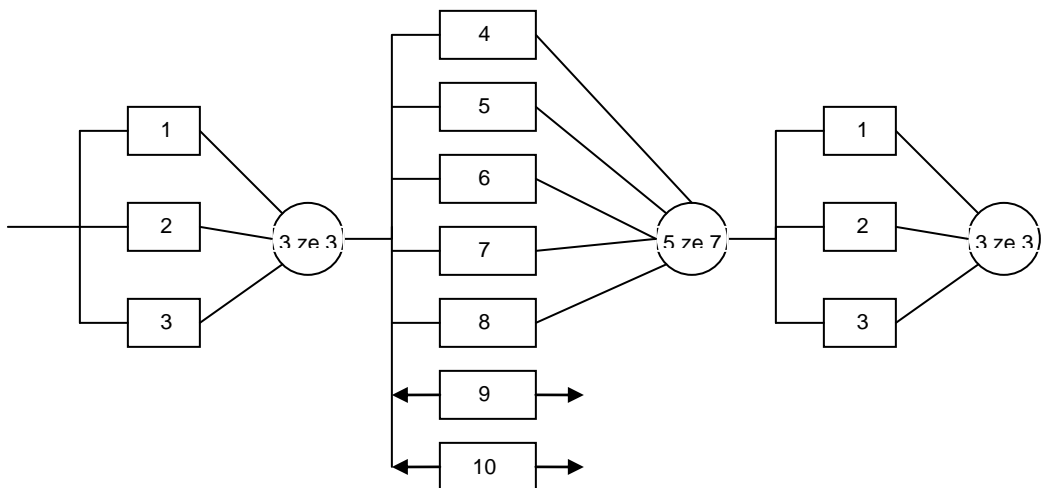
Obr. 7: Blokový diagram bezporuchovosti kompresorové stanice pro konfiguraci č. 5



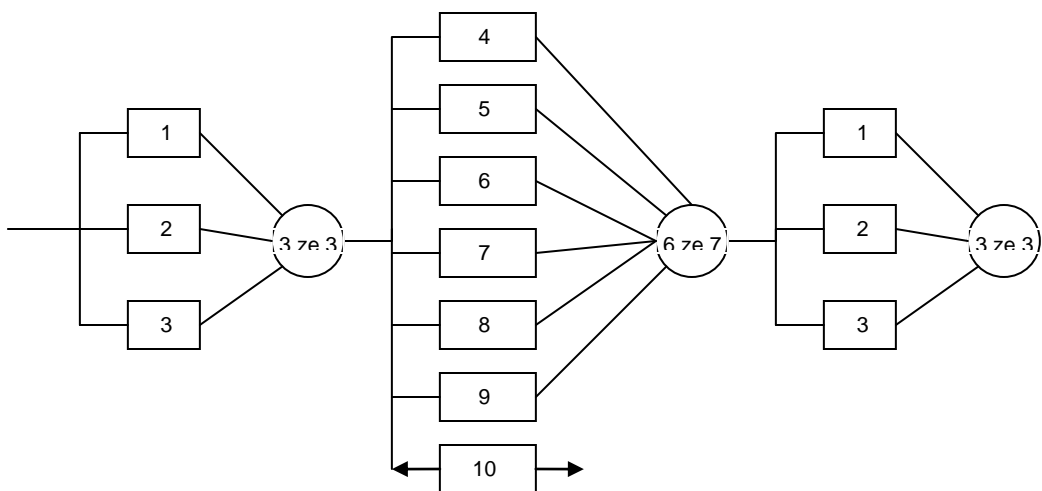
Obr. 8: Blokový diagram bezporuchovosti kompresorové stanice pro konfiguraci č. 6



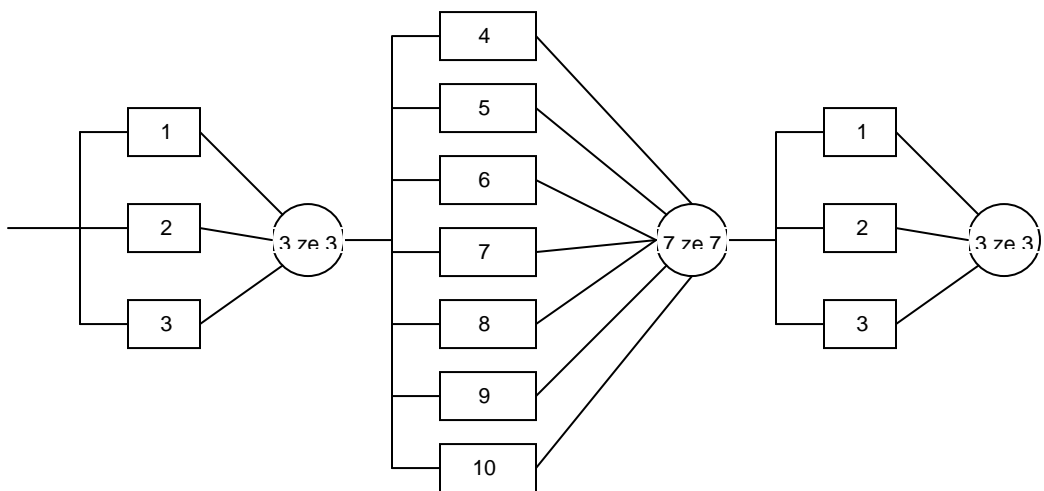
Obr. 9: Blokový diagram bezporuchovosti kompresorové stanice pro konfiguraci č. 7



Obr. 10: Blokový diagram bezporuchovosti kompresorové stanice pro konfiguraci č. 8



Obr. 11: Blokový diagram bezporuchovosti kompresorové stanice pro konfiguraci č. 9



Obr. 12: Blokový diagram bezporuchovosti kompresorové stanice pro konfiguraci č. 10

2.6 Markovský model výkonových konfigurací

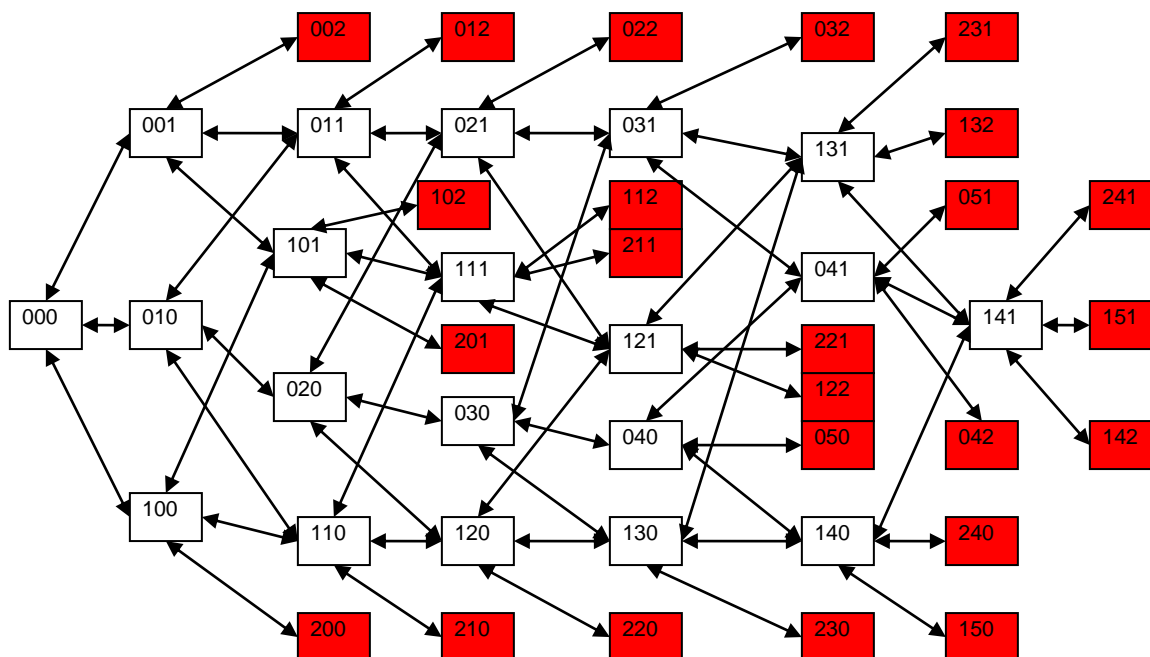
V kapitole 2.5 jsou zobrazeny RBD diagramy modelové úlohy kompresorové stanice ve všech výkonových režimech. V této kapitole jsou zobrazeny příslušné markovské diagramy ke všem výkonovým konfiguracím. Bíle označené stavy jsou stavy funkční nebo degradované. Červeně označené stavy jsou stavy nefunkční. V každém scénáři jsou nefunkční stavy různé.

Stav je označen červeně - jako nefunkční - v následujících případech:

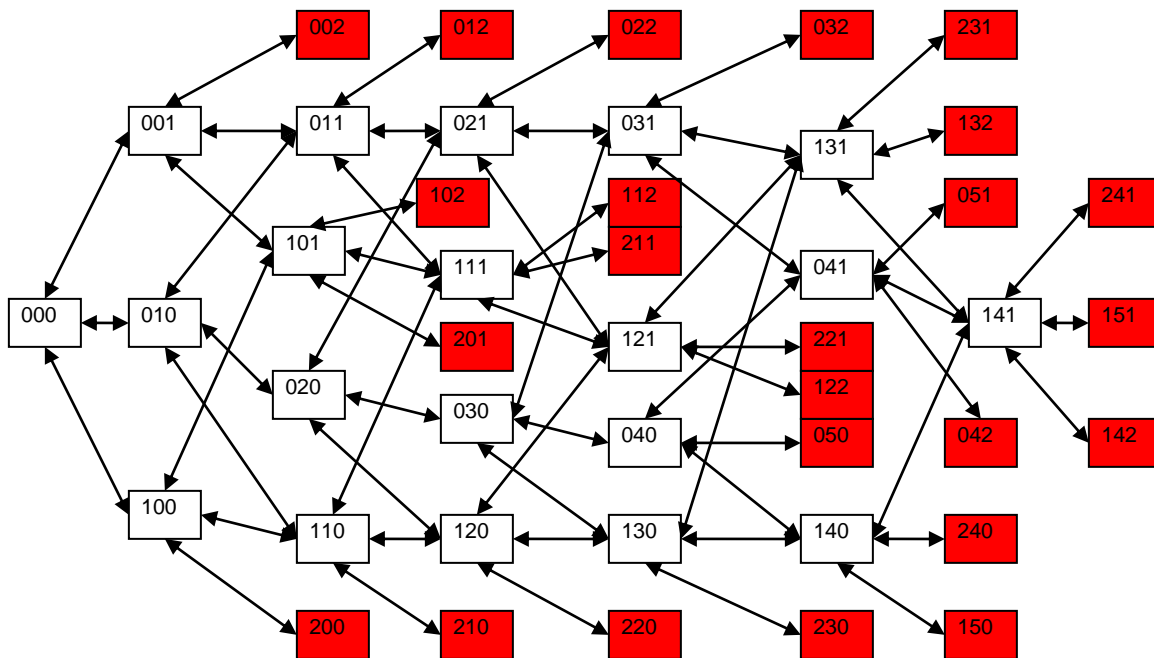
- Porucha pěti a více kompresorů vždy způsobí úplnou poruchu systému. Platí pro všechny výkonové konfigurace. Obdobně pro poruchu dvou a více linií. Pravděpodobnost, že se to skutečně stane je natolik malá, že tyto odpovídající stavy nebudou brány v potaz. Tento předpoklad platí pro všechny výkonové konfigurace.
- V poruše je více kompresorů než je potřeba pro transfer plynu. Příklad z celkového počtu 7 turbokompresorů, kdy je pro přepravu objemu plynu potřeba 5 turbokompresorů. Jestliže jsou v poruše alespoň tři, jedná se o poruchový stav.
- V poruše je více linií, než je potřeba pro transfer plynu.

Stav 132 reprezentuje poruchu jedné linie na vstupu, 3 turbokompresory v poruše a dvě porouchané linie na výstupu.

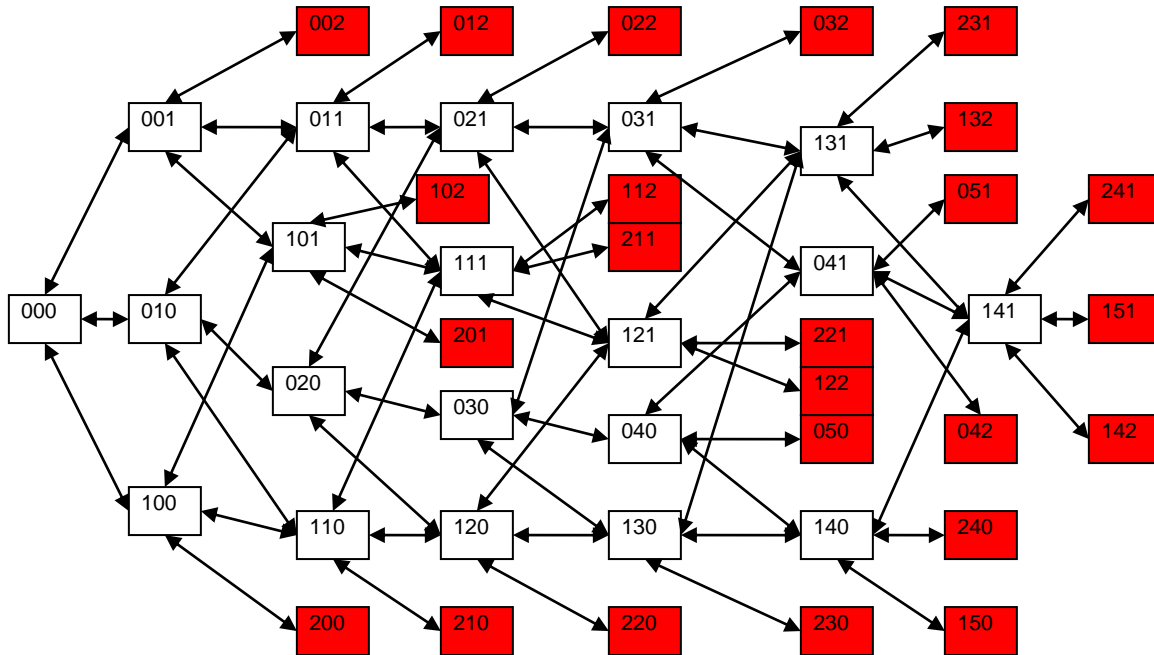
Intenzity přechodů jsou mezi jednotlivými stavy různé a dokonce jsou často různé i mezi stejnými přechody různých výkonových konfigurací.



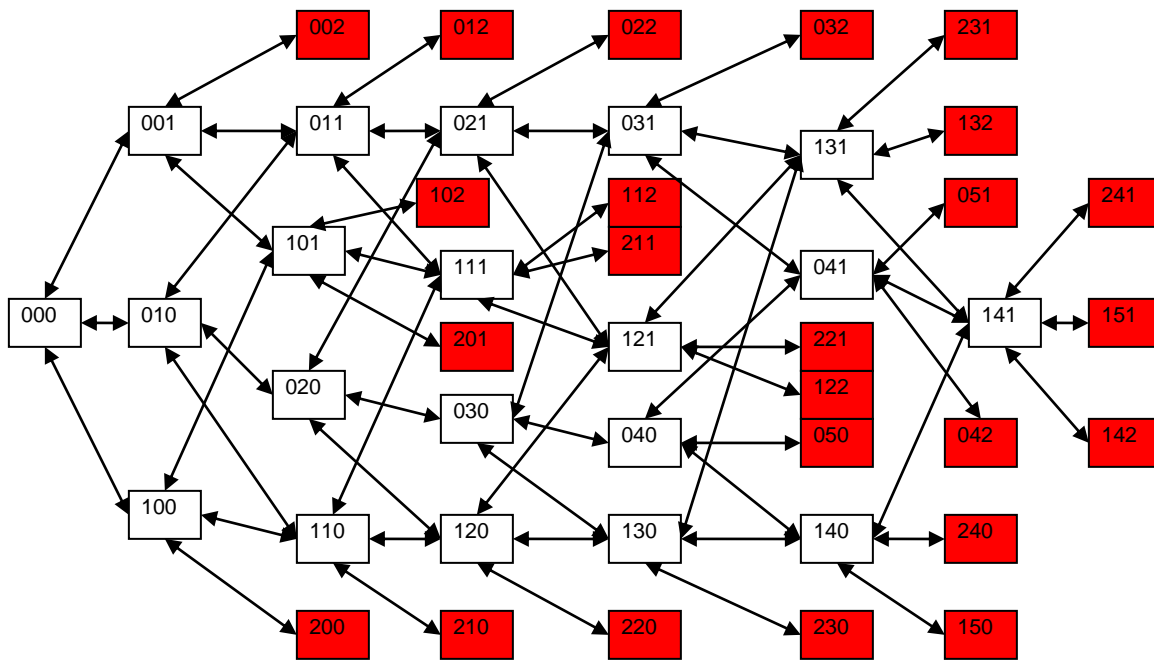
Obr. 13: Markovský model kompresorové stanice bez uvažování intenzity přechodů pro konfiguraci č. 1



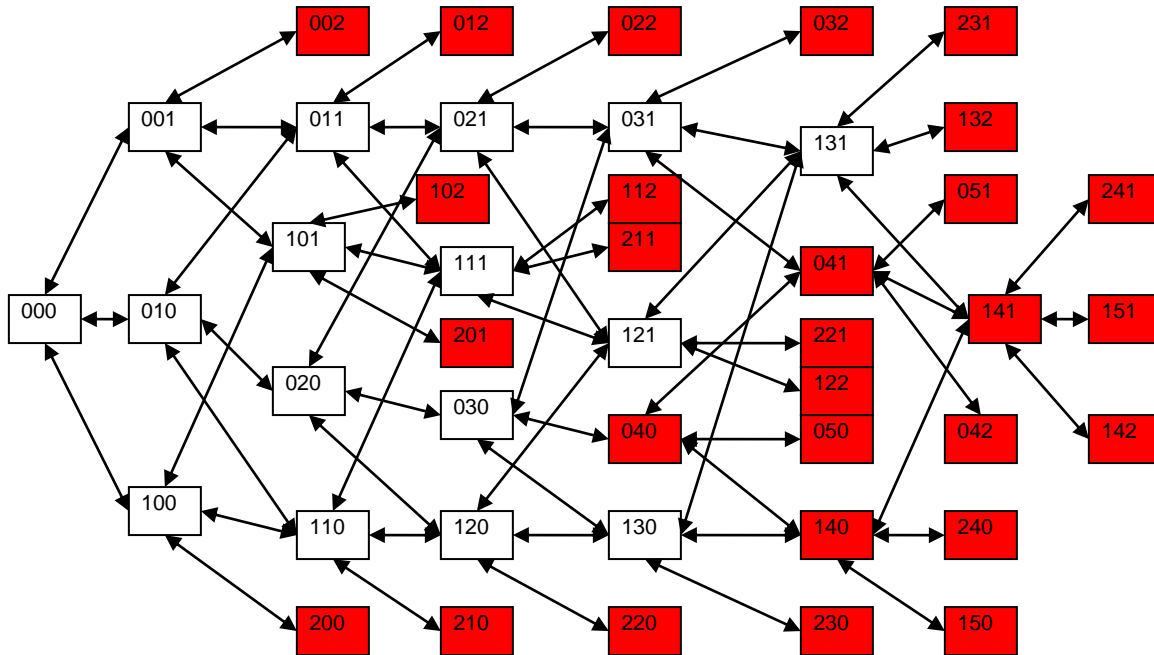
Obr. 14: Markovský model kompresorové stanice bez uvažování intenzity přechodů pro konfiguraci č. 2



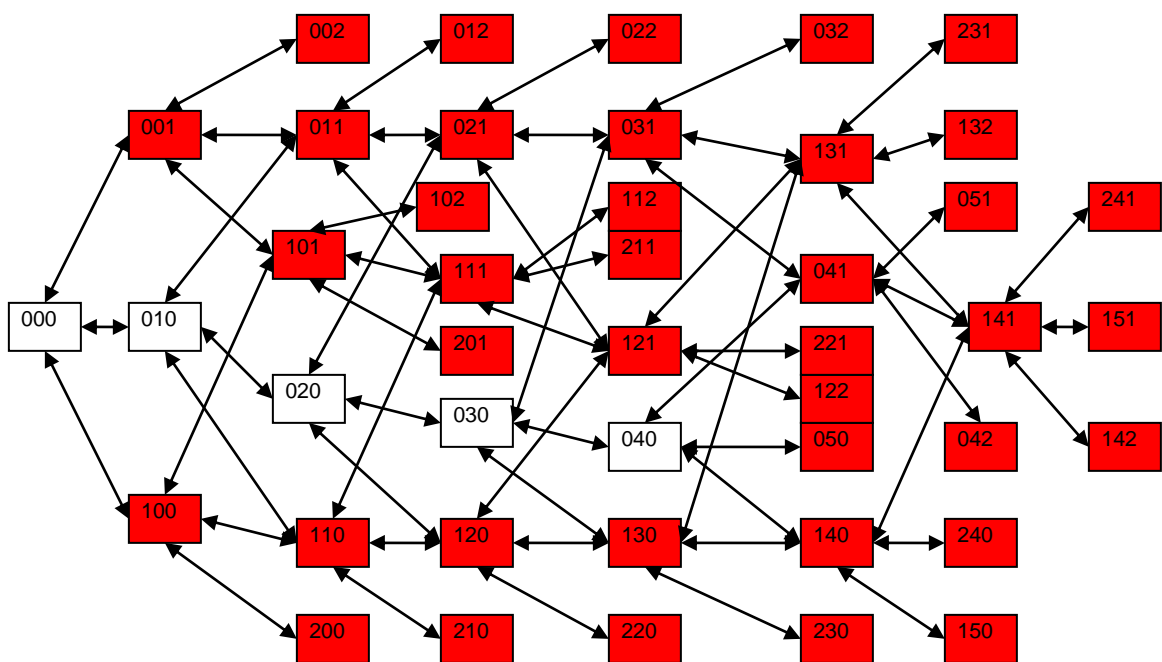
Obr. 15: Markovský model kompresorové stanice bez uvažování intenzity přechodů pro konfiguraci č. 3



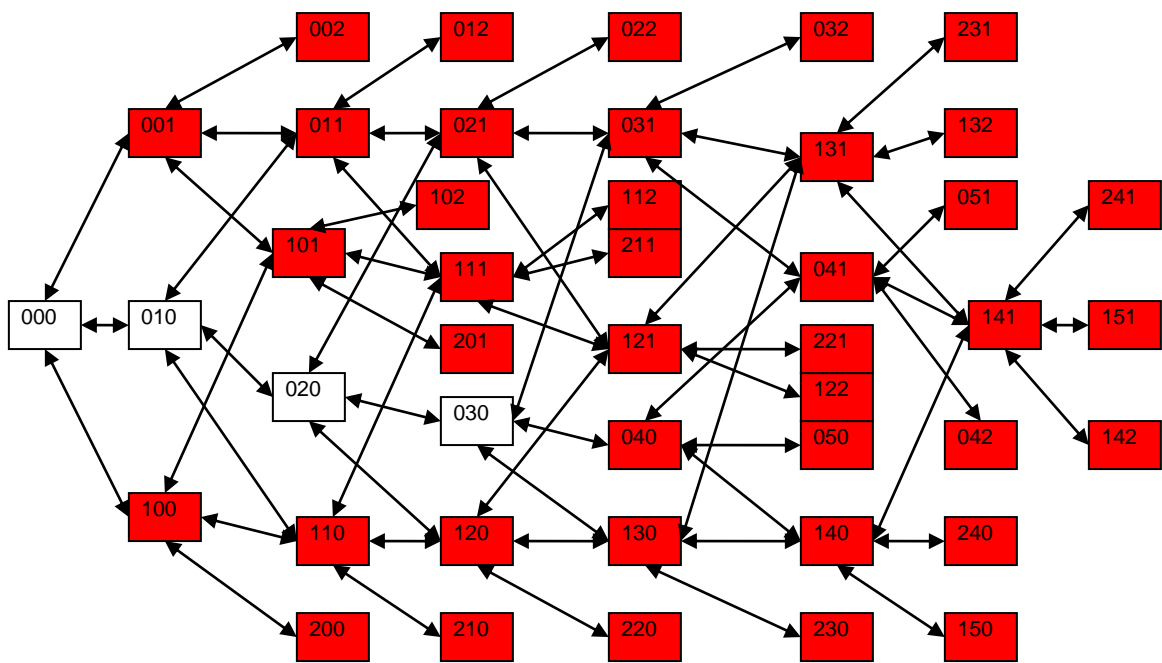
Obr. 16: Markovský model kompresorové stanice bez uvažování intenzity přechodů pro konfiguraci č. 4



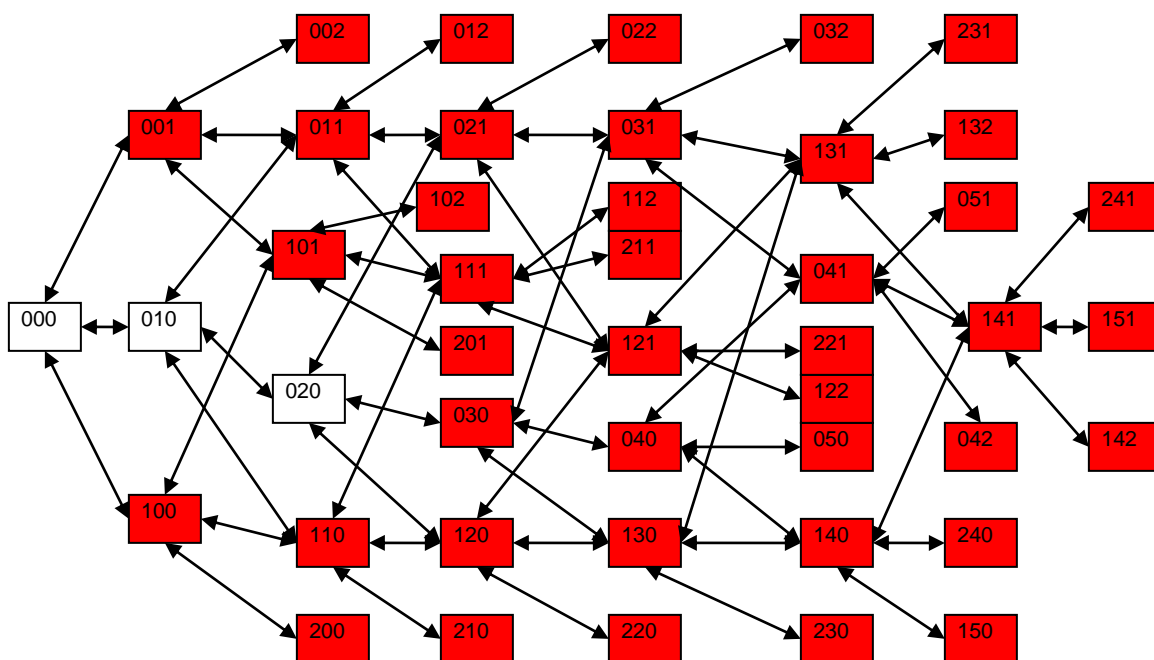
Obr. 17: Markovský model kompresorové stanice bez uvažování intenzity přechodů pro konfiguraci č. 5



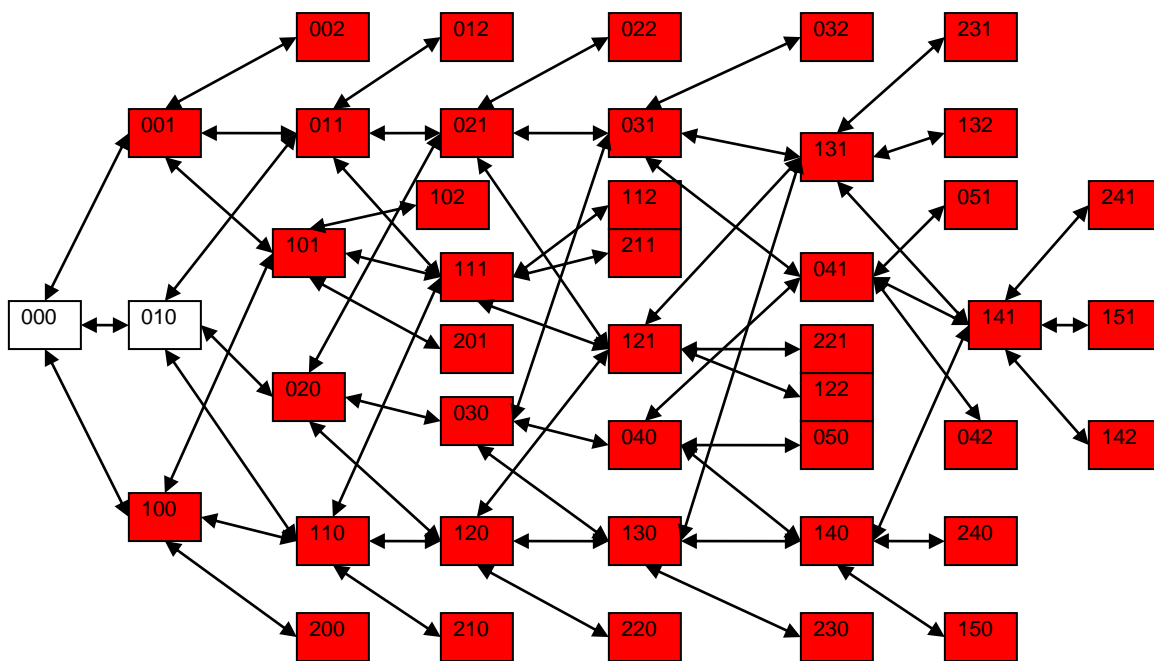
Obr. 18: Markovský model kompresorové stanice bez uvažování intenzity přechodů pro konfiguraci č. 6



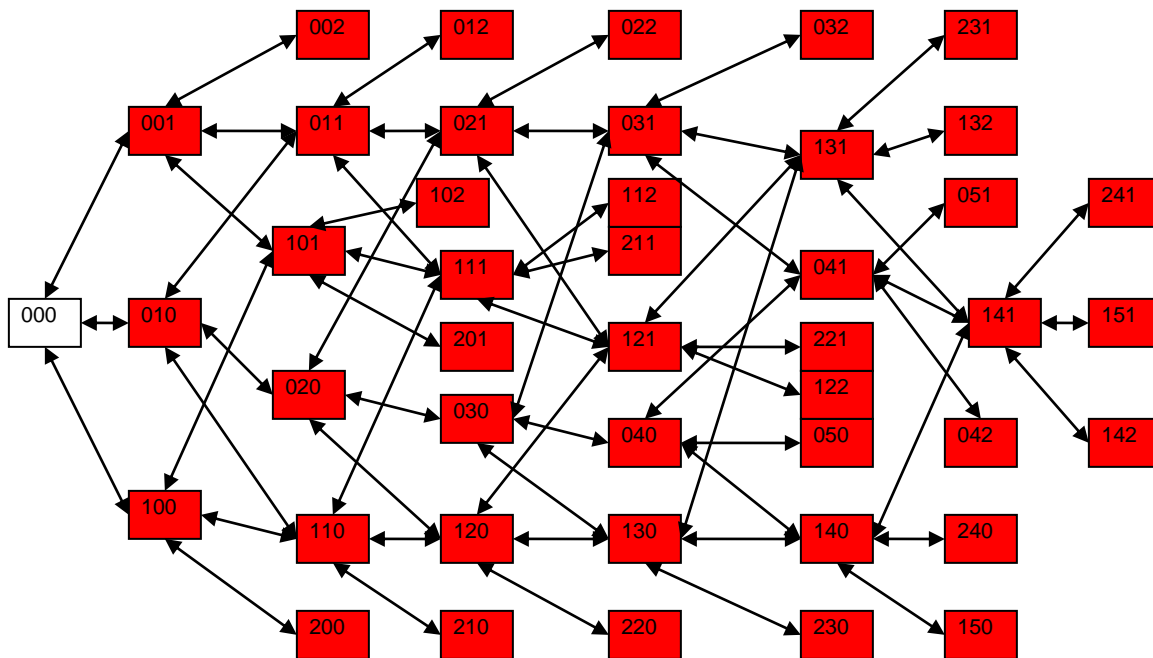
Obr. 19: Markovský model kompresorové stanice bez uvažování intenzity přechodů pro konfiguraci č. 7



Obr. 20: Markovský model kompresorové stanice bez uvažování intenzity přechodů pro konfiguraci č. 8



Obr. 21: Markovský model kompresorové stanice bez uvažování intenzity přechodů pro konfiguraci č. 9



Obr. 22: Markovský model kompresorové stanice bez uvažování intenzity přechodů pro konfiguraci č. 10

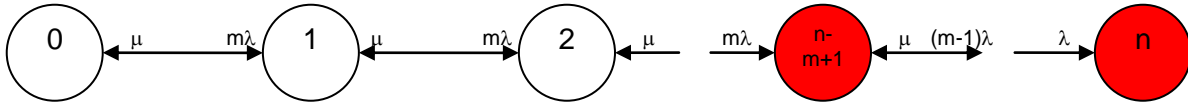
2.7 Intenzity přechodů výkonových konfigurací

Intenzita poruch vstupní linie je λ_1 , intenzita poruch turbokompresorů je λ_2 a intenzita poruch výstupních linií λ_3 . Obdobně intenzity oprav.

Markovské modely zobrazené na obr. 13 až 22 předpokládají zálohování m z n a zároveň jsou v pohotovostní záloze. Rozlišují se dva základní typy zálohy: aktivní a pohotovostní. Při aktivní záloze jsou v provozu všechny komponenty. Při pohotovostní záloze jsou pouze pro výrobu nutné komponenty. Náhradní komponenty se použijí až po poruše provozované komponenty.

Systém je tvořen n shodnými komponentami. Z toho je v provozu m komponent (viz RBD diagramy), které mají intenzitu poruch λ a intenzitu oprav μ . Zbylé komponenty jsou v pohotovostní záloze. To znamená, že porouchaná komponenta bude nahrazena záložní.

Stav 0 představuje 0 porouchaných z celkového množství komponent, stav 1 představuje jednu porouchanou komponentu atd. Intenzita přechodu ze stavu 0 do stavu 1 je $m\lambda$, protože v každém čase je právě m komponent v provozu. Obdobně intenzita poruch ze stavu 1 do stavu 2 je $m\lambda$. Nefunkční stavy jsou označeny červeně. Přechodový diagram zobrazuje obr. 23.



Obr. 23: Markovský přechodový diagram pro komponenty zálohované m z n s pohotovostní zálohou

2.8 Sestavení soustavy diferenciálních rovnic

Z přechodového diagramu, který má n stavů se vytvoří matice intenzit přechodů \mathbf{h} . Matice \mathbf{h} je čtvercová matice o velikosti $n \times n$. Prvek h_{ij} představuje intenzitu přechodu mezi stavy i a j . Diagonální prvky matice \mathbf{h} se dopočítají tak, aby součet všech prvků v řádku byl 1.

Definují se počáteční podmínky úlohy ve tvaru vektoru $\mathbf{p}(t)$. Často se předpokládá, že funkční stav by měl mít na začátku simulace počáteční podmínku rovnou 1. Součet počátečních podmínek přes všechny stavy musí být 1.

Při řešení úlohy spolehlivosti pomocí markovských procesů se řeší soustava obyčejných diferenciálních rovnic 1. řádu.

$$\frac{d\mathbf{p}(t)}{dt} = \mathbf{p}(t)\mathbf{h}$$

Soustava rovnic se řeší numericky. Výsledkem analýzy je například funkce okamžité pohotovosti $A(t)$, která se vypočte jako součet funkčních stavů v čase t .

3. Výsledky

Protože nebyla získána data o poruchách zařízení RWE Transgas, dále uváděné příklady jsou pouze ilustrativní a nemají žádnou spojitost se skutečnou pohotovostí zařízení.

Výsledkem řešených úloh je odhad funkce okamžité nepohotovosti $U(t)$ v čase. Vlivem údržbových zásahů a dále tím, že doba do poruchy/opravy zařízení nelze často popsat pomocí exponenciálního rozdělení, dochází k neexistenci asymptotické pohotovosti U . Výsledkem je funkce okamžité nepohotovosti $U(t)$, ze které lze zjistit součinitel střední nepohotovosti $\overline{U(t_1, t_2)}$. Pomocí střední nepohotovosti lze zjistit, zda systém splňuje/nespĺňuje technické, technologické a ekonomické parametry provozu. Pomocí grafu $U(t)$ lze například:

- plánovat periodickou údržbu systému,

$$\frac{d}{dt} [p_1(t) \quad \cdots \quad p_i(t)] = [p_1(t) \quad \cdots \quad p_i(t)] \cdot \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{i1} & \cdots & h_{ii} \end{bmatrix}$$

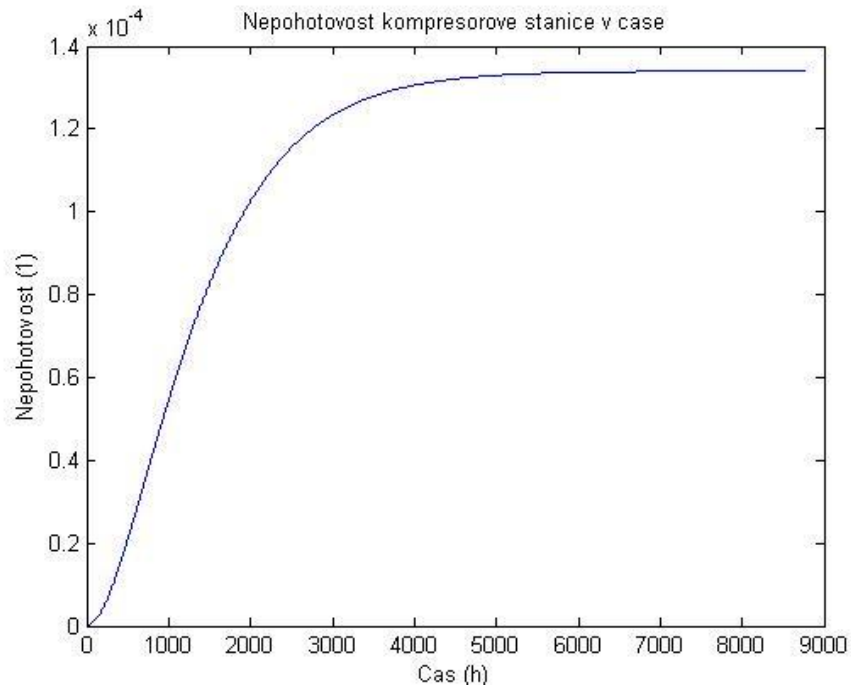
- zvyšovat pohotovost zařízení,
- popisovat degradaci komponent a systému,
- odhadnout čas, při kterém zařízení začne dosahovat nižší než předepsané pohotovosti,
- vytvářet ekonomické modely finančních zisků a ztrát založených na datech o provozu, poruchách a údržbě zařízení.

Pro úsporu místa budou ukázány výsledné grafy pro nejnižší výkonovou konfiguraci označenou 1 a pro silně zatíženou výkonovou konfiguraci označenou 7. Konfigurace 7 se prakticky pro vysoký průtok plynu nevyskytuje.

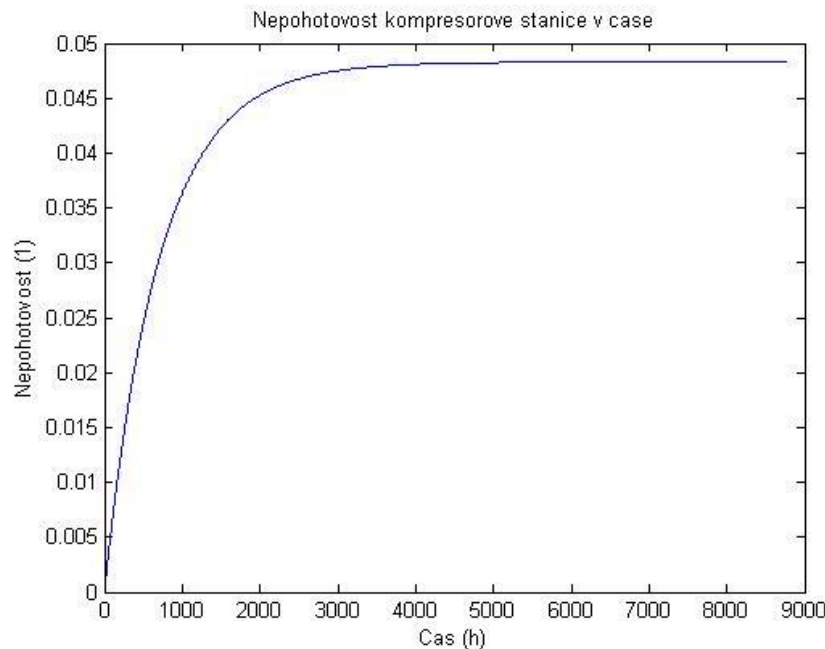
3.1 Systém s konstantní intenzitou poruch a bez periodické údržby

Intenzita poruch každého z prvků je $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{87600} \text{ h}^{-1}$ (střední doba do poruchy je 10 let). Intenzita obnov každého z prvků je $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \frac{1}{720} \text{ h}^{-1}$ (střední doba do obnovy je 1 měsíc).

Porovnáním obr. 24 a 25 se zjistí, že oba případy mají výrazně různou hodnotu asymptotické pohotovosti U . Dále mají odlišný počátek funkce okamžité pohotovosti. Konfigurace 1 má oproti konfiguraci 7 pozvolný náběh kolem počátku simulace způsobený volnými kapacitami linií a turbokompresorů.



Obr. 24: Průběh nepohotovosti v čase, exponenciální rozdělení doby do poruchy, konfigurace 1



Obr. 25: Průběh nepohotovosti v čase, exponenciální rozdělení doby do poruchy, konfigurace 7

3.2 Systém s nekonstantní intenzitou poruch

Weibullovým rozdělením se popisuje doba do poruchy komponent, které nelze popsat z důvodů degradace exponenciálním rozdělením. Vhodné testy, založené na metodě největší věrohodnosti, jsou uvedeny například v normě [1, 2, 3, 4]. Pomocí testů se zjistí optimální parametry rozdělení.

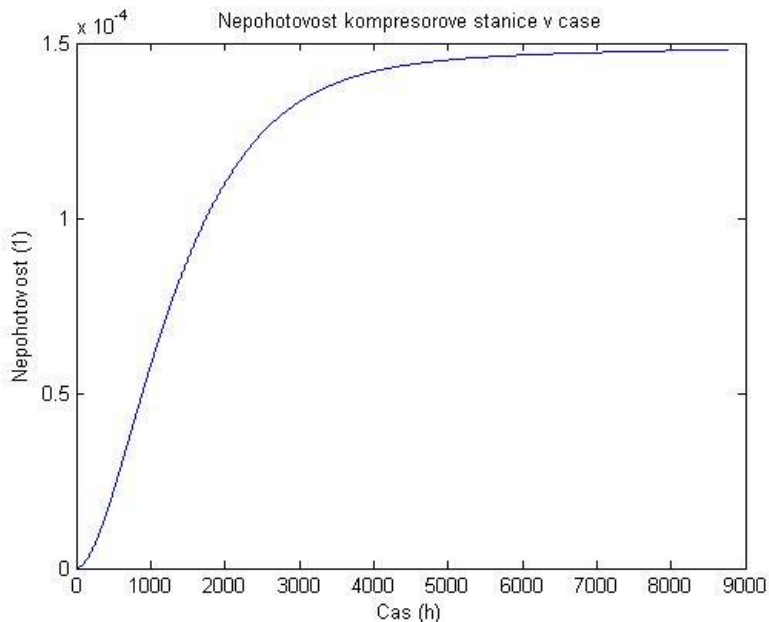
Dále se testem dobré shody χ^2 zjistí, zda parametry Weibullova rozdělení dobře popisují naměřená data. Pokud ano, lze přijmout parametry W.R., pokud ne je nutné hledat jiný model.

Weibullovo rozdělení se popisuje pomocí distribuční funkce, která je $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$ nebo ve spolehlivosti např. pomocí intenzity poruch $h(t) = \frac{\beta \cdot t^{\beta-1}}{\alpha^\beta}$.

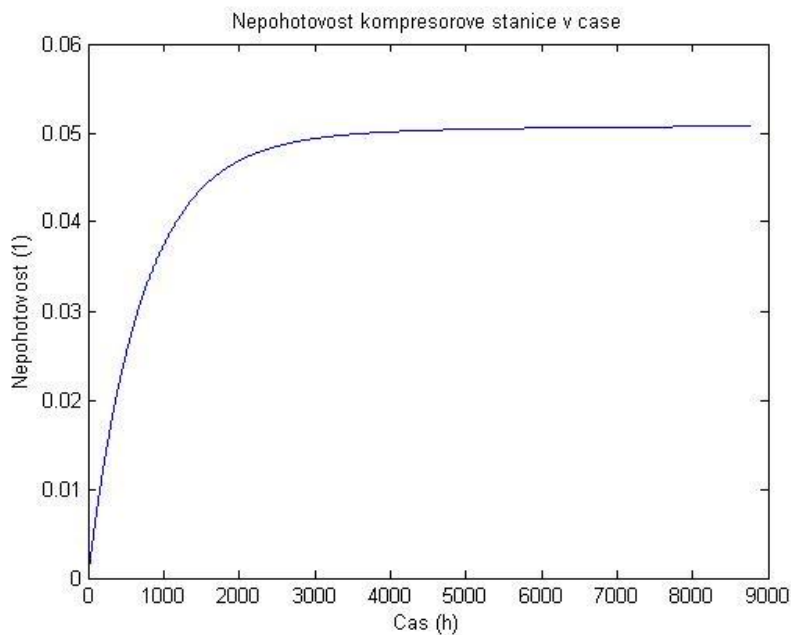
Nevýhodou Weibullova rozdělení je, při parametru $\beta > 1$, že intenzita poruch v čase $t = 0$ je nulová. Tento problém lze obejít superpozicí exponenciálního a Weibullova rozdělení ve tvaru $h(t) = \lambda + \frac{\beta \cdot t^{\beta-1}}{\alpha^\beta}$. Tento tvar intenzity poruch je též použit při řešení této úlohy.

Pro účely modelování byly intenzity poruch zvoleny shodně jako v odstavci 3.1 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{87600} \text{ h}^{-1}$. Obdobně intenzity oprav $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \frac{1}{720} \text{ h}^{-1}$. Parametr degradace je zvolen $\beta = 1,2$ a parametr $\alpha = 800000$.

Porovnáním obr. 26 a 27 se zjistí, že grafy mají odlišný počátek funkce okamžité nepohotovosti. Počátky jsou podobné grafům na obr. 24 a 25. Grafy nepohotovosti v této kapitole se liší od předcházejících grafů v neexistenci asymptotické nepohotovosti. Zatímco na obr. 24 a 25 se graf nepohotovosti ustálil na asymptotické hodnotě, na obr. 26 a 27 se nepohotovost stále zvyšuje.



Obr. 26: Průběh nepohotovosti v čase, Weibullovo rozdělení doby do poruchy, konfigurace 1

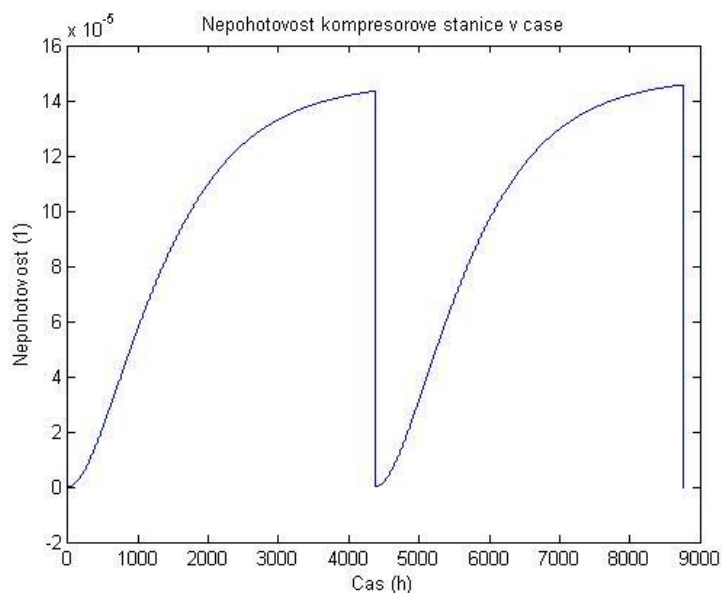


Obr. 27: Průběh nepohotovosti v čase, Weibullovo rozdělení doby do poruchy, konfigurace 7

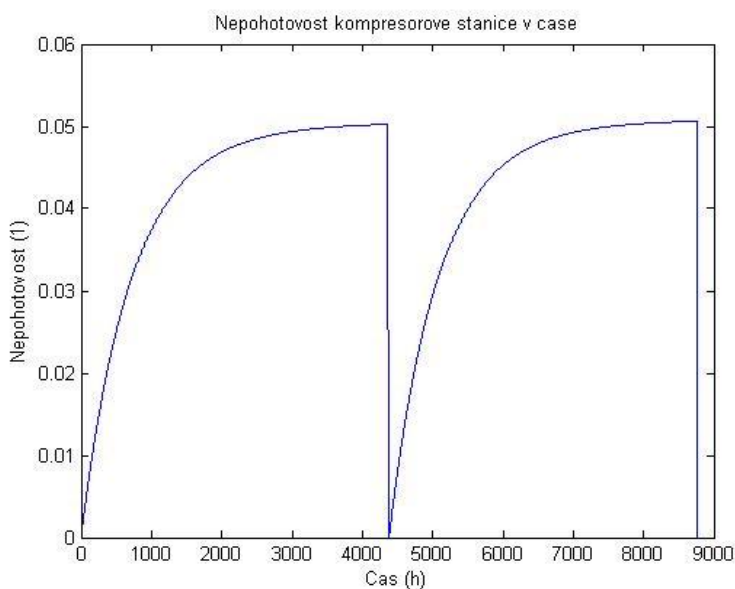
3.3 Systém s nekonstantní intenzitou poruch a periodickou údržbou systému

Na sledovaném systému se provádějí periodické údržby. Do modelu v kapitole 3.2 bude dále předpokládána periodická údržba systému. Pravidelná údržba linií se provádí každý půlrok - 4380 h. Pravidelná údržba kompresorů se provádí každé 3 měsíce - 2190h. Pravidelnou údržbou systému se sníží střední nepohotovost systému.

Na obr. 28 a 29 je vidět, že v čase periodické údržby - 4380 h se skokově sníží nepohotovost systému.



Obr. 28: Průběh nepohotovosti v čase, Weibullovo rozdělení doby do poruchy, s periodickou údržbou, konfigurace 1



Obr. 29: Průběh nepohotovosti v čase, Weibullovo rozdělení doby do poruchy, s periodickou údržbou, konfigurace 7

4. Závěr

Cílem tohoto příspěvku je ukázat jakým způsobem lze modelovat pohotovost systému pomocí markovských procesů. Pro mnoho odvětví při zjišťování parametrů spolehlivosti stačí asymptotické hodnoty pohotovosti. V těchto odvětvích je užívání markovských technik často velkým přepychem. Na druhou stranu je v poslední době silně cítit tlak na zjišťování dynamických parametrů spolehlivosti zařízení. Proto si myslím, že nebude dlouho trvat a dynamické modely spolehlivosti budou vyžadovány na zařízeních, kde se vyžaduje vysoká bezpečnost systému například chemický průmysl, jaderné elektrárny a samozřejmě železnice.

Na závěr je třeba zdůraznit důležitost modelování spolehlivosti tranzitních sítí. Stojí za připomenutí, že 25. července 2006 trval v České republice celých devět hodin stav elektrické nouze, který byl vyhlášen kvůli mimořádně velkému výpadku proudu, největšímu za posledních 30 let. Přenos média se řídí podobnými zákonitostmi, ať už máme na mysli plyn nebo elektřinu. Jedná se o dálkové přenosy, v nichž ČR je často „jen“ tranzitní zemí. Několik poruch může vyvolat poruchu celého systému.

Poděkování: Tento příspěvek vznikl díky finanční podpoře projektu AV ČR číslo 1ET401940412 s názvem Modelování a kvantifikace spolehlivosti dynamických systémů.

Literatura

- [1] ČSN IEC 50(191) (01 0102) *Medzinárodný elektrotechnický slovník, kapitola 191: Spolahlivosť a akosť služieb*. ČSN Praha, 1993, 109 stran.
- [2] ČSN IEC 60605-4 (01 0644) *Zkoušení bezporuchovosti zařízení – Část 4: Statistické postupy pro exponenciální rozdělení – Bodové odhady, konfidenční intervaly, předpovědní intervaly a toleranční intervaly*. ČNI Praha, 2002, 29 stran.
- [3] ČSN IEC 60605-6 (01 0644) *Zkoušení bezporuchovosti zařízení – Část 6: Testy platnosti předpokladu konstantní intenzity poruch nebo konstantního parametru proudu poruch*. ČNI Praha, 1998, 15 stran.
- [4] ČSN EN 61164 (01 0647) *Růst bezporuchovosti - Metody statistických testů a odhadů*, ČNI Praha 2005, 48 stran.
- [5] ČSN IEC 61649 (01 0653) *Testy dobré shody, konfidenční meze pro data s Weibullovým rozdělením*. ČNI Praha, 1998, 16 stran.
- [6] www.weibull.com
- [7] 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
- [8] Chudoba J.: *Evaluation of dependability by using Markov analysis*. International Workshop on Electronics, Control, Measurement and Signals. Toulouse, 2005.

- [9] Chudoba J.: *Analysis of the probability of car accidents*. In: The second international conference “Reliability, safety and diagnostics of transport structures and means 2005”. Pardubice, 2005.
- [10] Lisnianski A., Levitin G., *Multi-State System Reliability. Assessment, Optimization, Applications*. World Scientific, New Jersey, London, Singapore, Hong Kong, 2003

APLIKACE FMECA PŘI HODNOCENÍ RIZIKA DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY

Ing. Jaroslav Zajíček, Ústav řízení systémů a spolehlivosti, Technická univerzita v Liberci
jaroslav.zajicek@tul.cz

1 ÚVOD

Analýza spolehlivosti a rizik technických systémů využívá jak kvalitativního hodnocení, tak i semikvantitativních a kvantitativních metod. Riziko selhání dopravní infrastruktury lze rovněž hodnotit těmito metodami. Tam, kde nelze nebo není účelné aplikovat sofistikované postupy kvantitativního hodnocení rizika je možné s úspěchem využít méně náročné semikvantitativní metody. Takovou aplikací může být indexové hodnocení kritičnosti na základě multikriteriální FMECA. Příklad možného využití semikvantitativních metod pro hodnocení dopravní infrastruktury je obsahem příspěvku.

2 RIZIKO SELHÁNÍ DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY

Řešení krizových situací dopravní infrastruktury není a nemůže být jen schopnost rychlé odezvy na vzniklou krizovou situaci. Jeho součástí je schopnost předcházení vzniku takovýchto situací (prevence) a pokud nastanou, tak schopnost zmírnění následků (ochrana). Jedná se o standardní případ řízení rizika. Omezení funkčnosti či dokonce selhání dopravní infrastruktury je tedy krizovou situací a představuje tak vhodný příklad na demonstrování využitelnosti některých postupů řízení rizika tak, jak je chápáno v technické praxi. Při hodnocení rizika dopravní infrastruktury je nutné uvažovat mnoho faktorů, které ho významným způsobem ovlivňují. Základní přístup, kdy je riziko interpretováno jako součin pravděpodobnosti vzniku nežádoucí situace a jejích následků, zde zůstává, následky jsou však modelovány jako kombinace více vstupů.

Parametry ovlivňující riziko selhání objektu

1. Intenzita výskytu události
2. Náklady na obnovu
3. Vícenáklady na objížďku
4. Hustota dopravy
5. MTTR - doba do obnovy
6. Vliv na bezpečnost / životy

Dopravní infrastrukturou nelze chápat pouze liniové části silnice či železnice. Na těchto dopravních sítích jsou další objekty, z kterých plyne mnohdy vyšší riziko. Na silniční a železniční síti uvažujeme následující typy objektů.

Silniční síť

1. Most
2. Tunel
3. Křižovatka

4. Úsek silnice
5. Železniční přejezd

Železniční síť

1. Most
2. Tunel
3. Železniční přejezd
4. Nádraží
5. Úsek železnice
6. Křížení, rozvětvení

3 ANALÝZA FMECA

Analýza rizik využívá některé z metod používaných v oboru spolehlivosti k analýze složitých systémů. Pro analýzu kritičnosti se zpravidla aplikuje analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch, která bývá podle originálního anglického názvu obvykle označována jako metoda FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis). Např. při hodnocení kritičnosti poruch komponent technického zařízení je cílem této metody stanovit rizikové číslo RN pro jednotlivé předvídané poruchy. Pomocí rizikového čísla je možno zjistit komponenty, které zásadním způsobem ovlivňují bezporuchovost zařízení.

Analýzu FMECA lze provádět na úrovni semikvantitativní nebo kvantitativní. U semikvantitativního přístupu se uvažované faktory hodnotí pomocí předem stanovených bodových stupnic, např. 1-5 nebo 1-10. Výsledné rizikové číslo je pak dáno vhodnou kombinací ohodnocených faktorů. Výhodou semikvantitativního přístupu je rychlejší postup analýzy bez nutné znalosti přesných hodnot sledovaných faktorů. Nevhodně zvolený výpočet rizikového čísla však může způsobit chybné výsledky. Plně kvantitativní FMECA zaručuje správný výpočet, vyžaduje ovšem přesná vstupní data do analýzy.

3.1 SEMIKVANTITATIVNÍ FMECA

Obecně lze chápat, že hodnota rizikového čísla RN je nějakým způsobem odvislá od hodnot jednotlivých rizikových faktorů F_i z celkového počtu n možných rizikových faktorů a to podle vztahu (1).

$$RN = f(F_1, F_2, F_3, \dots, F_n) \quad (1)$$

Hodnoty jednotlivých faktorů se vyjadřují body, přičemž hodnotící škála, tj. přiřazení daného počtu bodů jednotlivým efektům, může mít lineární, logaritmický nebo jiný charakter. Rovněž volba funkční závislosti RN na rizikových faktorech F_i sehrává značnou úlohu pro úspěšnou aplikaci multikriteriální FMECA. Při analýze tohoto problému jsou používány následující symboly.

- RN - rizikové číslo
- N - následky
- F_i - i -tý faktor
- F_{n_i} - i -tý faktor následků

n - počet faktorů

v_i - váha faktoru

V následujícím textu je tedy provedena analýza některých možných kombinací rizikových faktorů.

3.2 KOMBINACE RIZIKOVÝCH FAKTORŮ

Součet hodnot jednotlivých rizikových faktorů

$$N = \sum_{i=1}^n Fn_i \quad (2)$$

Součet hodnot jednotlivých faktorů je vhodný při lineárně volené stupnici následků všech faktorů. Použití aritmetického průměru hodnot rizikových faktorů má naprosto shodnou vypovídací schopnost jako součet, pouze hodnota je n-krát menší (poměr je totožný). Pro kombinaci následků a pravděpodobnosti nastoupení nežádoucí události je součet nevhodný.

Geometrický průměr hodnot jednotlivých rizikových faktorů

$$N = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n Fn_i} \quad (3)$$

Teoreticky je možné použití pro degresivní nárůst následků se zvyšující se hodnotou příslušného rizikového faktoru, ale v praxi je téměř nepoužitelné.

Součin hodnot jednotlivých rizikových faktorů

$$N = \prod_{i=1}^n Fn_i \quad (4)$$

Pro semikvantitativní analýzu, kde se vyskytuje více rizikových faktorů nelze tento postup doporučit. Rizikové faktory s nízkým bodovým ohodnocením potlačují vliv kritických rizikových faktorů ve výsledném rizikovém čísle.

Součin se běžně používá při kvantitativním hodnocení, kde jedním z činitelů je např. intenzita nastoupení nežádoucí události a druhým jednokriteriální následky (např. ekonomická ztráta).

Součet mocnin hodnot jednotlivých rizikových faktorů

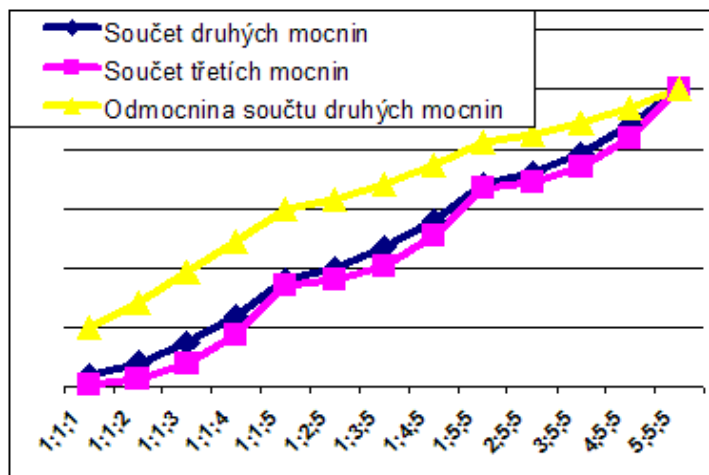
$$N = \sum_{i=1}^n Fn_i^x \quad (5)$$

Teoreticky je použití tohoto postupu možné pro zvyšující se nárůst následků se zvyšující se hodnotou příslušného rizikového faktoru. Mocnina ve vzorci zdůrazní faktory s vysokým bodovým ohodnocením. Nelineární stupnice se používá velmi často, například při hodnocení následků na zdraví, kde nejhorším následkem může být smrt několika lidí, zatímco následek s polovičním bodovým ohodnocením bude pouze mírné zranění jedné osoby (bylo by zavádějící srovnávat dvě zranění se smrtí více osob).

Tento výpočet je také možné modifikovat jako odmocninu součtu mocnin (pořadí nežádoucích událostí bude zachováno, změní se však poměr hodnot).

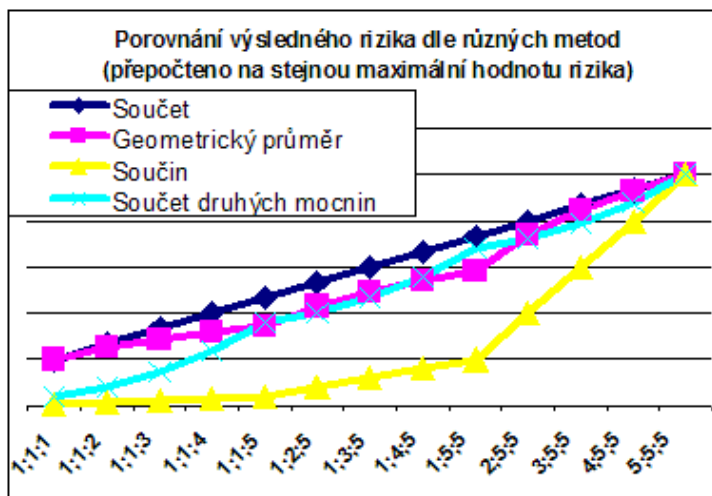
Porovnání metod kombinace rizikových faktorů

Průběh výše uvedených mocninových funkcí je zřejmý z obr. 1, kde na svislou osu jsou vyneseny hodnoty funkce a na vodorovnou osu jsou vyneseny možné bodové hodnoty trojice rizikových faktorů. Faktory mohly nabývat hodnoty v rozmezí 1 až 5.



Obr. 1: Průběh hodnot mocnin pro kombinace hodnot tří faktorů

Pro názorné srovnání uvedených metod kombinace faktorů je sestaven graf, kde byly uvažovány 3 různé faktory, ovlivňující výsledné riziko, jejichž hodnoty jsou vyneseny na vodorovné ose. Pro přehlednost bylo riziko jednotlivých metod přepočítáno na stejnou maximální hodnotu. Výsledek porovnání je zřejmý z obr. 2.



Obr. 2: Porovnání vlivu použité metody na hodnotu rizikového čísla

Váha jednotlivých faktorů

V reálné praxi nemají faktory zpravidla stejnou důležitost. Pokud tedy mají uvažované faktory v analýze různou důležitost, je možné jim přiřadit váhu. Výše uvedené vzorce a charakteristiky se

nemění, pouze hodnota faktoru F_i přechází na váženou hodnotu faktoru $F_i \cdot v_i$, viz níže uvedený vztah (6).

$$F_i \rightarrow v_i \cdot F_i, \text{ kde běžně } \sum_{i=1}^n v_i = 1 \quad (6)$$

Shrnutí

Uvedené metody jsou pouze příkladem možných řešení. Pro konkrétní bodové stupnice kritérií je nutné vybrat optimální výpočet výsledného rizika nebo naopak pro zvolený výpočet rizika vhodně navrhnout stupnice jednotlivých kritérií. Pro stupnici následků volenou lineárně je vhodný součet hodnot, případně jejich průměr. Pro stupnici následků volenou nelineárně je vhodnější např. součet druhých mocnin, případně modifikace mocnin.

4 MULTIKRITERIÁLNÍ FMECA DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY

V kapitole 2 bylo definováno 6 různých faktorů, ovlivňujících riziko nežádoucí události na objektech silniční a železniční sítě. Ke každému z výše uvedených faktorů byla vytvořena bodová stupnice v rozsahu 1 až 5. Rozdělení do pětistupňové škály nevyžaduje vysoké nároky na hodnotitele a navíc poskytuje dostatečnou přesnost výsledků prováděných analýz.

4.1 BODOVÉ STUPNICE HODNOCENÝCH FAKTORŮ

Intenzita výskytu události

Vytvořená stupnice je přibližně logaritmická s přihlédnutím na běžně používané časové jednotky.

X1	Intenzita výskytu události
1	1x za 100 let
2	1x za 10 let
3	1x za rok
4	1x za měsíc
5	1x za týden a častěji

Náklady na obnovu

Náklady na obnovu jsou tzv. jednorázové náklady - tyto náklady nejsou závislé na času, po který bude obnova probíhat.

X2	Náklady na obnovu
1	do 10 000 Kč
2	do 100 000 Kč
3	do 1 000 000 Kč
4	do 10 000 000 Kč
5	nad 10 000 000 Kč

Vícenáklady na objížděku

Vícenáklady na objížděku jsou reprezentovány rozdílem délek tras (původní trasa a objížděka) v kilometrech. Spodní hranice (do 10km) se bude vztahovat především na silnice nižších tříd, kde je silniční síť hustší, naopak nejvyšší hodnota (nad 100km) bude ve většině případů reprezentovat objížděku po železniční síti.

X3	Vícenáklady na objížděku
1	do 10km
2	do 20km
3	do 50km
4	do 100km
5	nad 100km

Hustota dopravy

Hodnotící stupnice hustoty dopravy byla vytvořena na základě údajů ze statistických ročenek Ministerstva dopravy ČR.

X4	Hustota dopravy
1	do 5 ks/h
2	5 až 50 ks/h
3	30 až 150 ks/h
4	I.třída (100 až 2 000 ks/h)
5	dálnice (1 000 až 5 000 ks/h)

MTTR - doba do obnovy

Doba do obnovy je čas od vzniku nežádoucí události až po plné zprovoznění hodnoceného objektu. Stupnice zvolena na základě běžně používaných jednotek času.

X5	MTTR - doba do obnovy
1	do 8 hodin (1 směna)
2	do 1 dne
3	do týdne
4	do měsíce
5	do roku

Vliv na bezpečnost / životy

Vliv na bezpečnost, případně životy lidí, se hodnotí pro fázi vzniku nežádoucí události. Zdravotní následky způsobené během obnovy/opravy v analýze zanedbáváme.

X6	Vliv na bezpečnost / životy
1	poškození zdraví bez trvalého následku
2	poškození zdraví s trvalými následky
3	úmrťi jedné osoby
4	úmrťi 2-10 osob
5	úmrťi 11-100 osob

4.2 TRANSFORMACE SEMIKVANTITATIVNÍHO HODNOCENÍ NA KVANTITATIVNÍ

Sestavení modelu, který by počítal pouze s bodovým ohodnocením jednotlivých faktorů, by bylo velmi složité. Bylo by nutné správně zvolit váhové faktory a dále také uvažovat, zda je stupnice zvolena lineárně, logaritmicky atd.

Jednodušší a přesnější variantou je převod na čistě kvantitativní hodnocení. Uvažované faktory tedy vyjádříme v jednotkách dle následující tabulky.

F1 Intenzita výskytu události	1/h
F2 Náklady na obnovu	Kč
F3 Vícenáklady na objížďku	Kč/ks
F4 Hustota dopravy	ks/h
F5 MTTR - doba do obnovy	h
F6 Vliv na bezpečnost / životy	Kč

Intenzita výskytu události

X1	Pravděpodobnost nastoupení jevu	F1 [1/h]
1	1x za 100 let	1,0E-06
2	1x za 10 let	1,0E-05
3	1x za rok	1,0E-04
4	1x za měsíc	1,0E-03
5	1x za týden a častěji	1,0E-02

Náklady na obnovu

X2	Náklady na obnovu	F2 [Kč]
1	do 10 000 Kč	5,00E+03
2	do 100 000 Kč	5,00E+04
3	do 1 000 000 Kč	5,00E+05
4	do 10 000 000 Kč	5,00E+06
5	nad 10 000 000 Kč	5,00E+07

Vícenáklady na objížďku (Silniční síť)

(Hodnoty byly získány z poměru osobní a nákladní dopravy a jejich kilometrových nákladů.)

X3	Vícenáklady na objížďku	F3 [Kč]
1	do 10km	50
2	do 20km	150
3	do 50km	300
4	do 100km	600
5	nad 100km	1000

Hustota dopravy

X4	Hustota dopravy	F4 [ks/h]
1	do 5 ks/h	3
2	5 až 50 ks/h	30
3	30 až 150 ks/h	100
4	I.třída (100 až 2 000 ks/h)	1000
5	dálnice (1 000 až 5 000 ks/h)	2500

MTTR - doba do obnovy

X5	MTTR - doba do obnovy	F5 [h]
1	do 8 hodin (1 směna)	4
2	do 1 dne	12
3	do týdne	100
4	do měsíce	500
5	do roku	5000

Vliv na bezpečnost / životy

X6	Vliv na bezpečnost / životy	F6 [Kč]
1	poškození zdraví bez trvalého následku	2,0E+04
2	poškození zdraví s trvalými následky	2,0E+05
3	úmrtí jedné osoby	2,0E+06
4	úmrtí 2-10 osob	2,0E+07
5	úmrtí 11-100 osob	2,0E+08

4.3 MODEL VÝPOČTU RIZIKA

V případě, že se úspěšně provedl převod viz. kap.4, nyní je již snadné získat rizikové číslo hodnocené nežádoucí události.

Součinem jednotkových vícenákladů na objížďku (F3) a hustotou dopravy (F4) získáme hodinové ztráty z objížďky. Po vynásobení dobou do obnovy (F5) již máme celkové náklady z objížďky v Kč.

$$F3 * F4 * F5$$

$$[\text{Kč/ks} * \text{ks/h} * \text{h}] = [\text{Kč}]$$

Jednorázové náklady na obnovu (F2) a vliv na bezpečnost / životy (F6) jsou již v Kč, je tedy možné je pouze přičíst.

$$F2 + F3 * F4 * F5 + F6$$

$$[\text{Kč} + \text{Kč} + \text{Kč}] = [\text{Kč}]$$

V této chvíli jsou již známy finančně ohodnocené důsledky z analyzované události. Tyto důsledky násobíme intenzitou výskytu události, čímž získáváme rizikové číslo v Kč/h.

$$RN = F1 * (F2 + F3 * F4 * F5 + F6)$$

$$[1/h * K\check{c}] = [K\check{c}/h]$$

Jak bylo již zmíněno, ke každému objektu lze analyzovat více nežádoucích událostí. V tomto případě je pak výsledné rizikové číslo objektu dáno součtem všech dílčích rizikových hodnot analyzovaných událostí na příslušném objektu.

$$RN_v = \sum RN_i$$

4.4 ZPĚTNÝ PŘEPOČET VÝSLEDNÉHO RIZIKA DO BODOVÉ STUPNICE

Vzhledem k charakteru vstupu je žádoucí, aby i výsledné rizikové číslo bylo z předem definované stupnice. V následující tabulce je příklad transformace výsledného rizikového čísla v Kč/h do bodové stupnice.

RN [Kč/h]	Rbod
0,025 až 0,1	1
0,1 až 0,4	2
0,4 až 1,6	3
1,6 až 6,4	4
6,4 až 25	5
25 až 100	6
100 až 400	7
400 až 1 600	8
1 600 až 6 400	9
více než 6 400	10

5 ZÁVĚR

V článku je názorně ukázáno, jakým způsobem lze postupovat při semikvantitativní analýze FMECA. Transformace vstupů do reálných jednotek a výstupu zpět do bodové stupnice je výhodná především při hodnocení mnoha faktorů, které ovlivňují nežádoucí stav. Předpokládá se využití softwarového nástroje, který by transformace vstupů a výpočet výsledného rizikového čísla prováděl automaticky na základě uložených tabulek a vzorců. Tím by byla zachována největší výhoda semikvantitativního přístupu, a to poměrně rychlé zadávání vstupních dat na základě přibližného výpočtu nebo expertního odhadu.

Poznámka: Bodové stupnice a jejich transformační tabulky jsou pouze ilustrativním příkladem a jejich naplnění je možné uzpůsobit požadavkům zadavatele a dle jeho zkušeností.

Poděkování

Tato práce byla vytvořena s finanční podporou Ministerstva dopravy České republiky, projekt číslo 1F44E/015/030 „Dopravní infrastruktura jako kritický prvek Národní infrastruktury z hlediska zabezpečení základních funkcí státu“.

HODNOCENÍ KRITICHNOSTI NÁRODNÍ INFRASTRUKTURY

Ing. Pavel Fuchs, Ústav řízení systémů a spolehlivosti, Technická univerzita v Liberci
pavel.fuchs@tul.cz

1 ÚVOD

Přestože národní (kritická) infrastruktura České republiky představuje různorodý konglomerát jednotlivých infrastruktur je žádoucí k její analýz přistupovat ze systémového hlediska. Je zde tedy možné aplikovat některé postupy hodnocení rizik technických systémů pro stanovení důležitosti jednotlivých prvků infrastruktury. S výhodou lze pro hodnocení kritičnosti infrastruktury využít semikvantitativní přístup. Podobně jako se u technických systémů využívá hodnocení formou matice rizika, lze zde využívat matici kritičnosti segmentů. Tato matice umožňuje ocenění závažnosti ztráty funkce segmentu v závislosti na čase formou expertního odhadu. Na základě tohoto postupu pak lze ocenit důležitost jednotlivých segmentů národní infrastruktury z různých hledisek což je důležité pro efektivní rozhodování o alokaci finančních prostředků do národní (kritické) infrastruktury.

2 KRITICKÁ INFRASTRUKTURA ČR A DRUHY OHROŽENÍ

Národní infrastruktura ČR je poněkud zavádějícím způsobem označována termínem „kritická infrastruktura“, viz [1]. Pod kritickou infrastrukturou se v ČR zahrnuje 10 sektorů³, pro které je třeba stanovit jejich vzájemné vztahy a citlivost na narušení funkčnosti z definovaných příčin. Těchto 10 sektorů pokrývá celkem 42 produktů a služeb, viz tab. 1.

Tab. 1: Oblasti národní kritické infrastruktury

Sektor	Segment (produkt nebo služba)
1 Energetika	1.1 Elektřina
	1.2 Plyn
	1.3 Tepelná energie
	1.4 Ropa a ropné produkty
2 Vodní hospodářství	2.1 Zásobování pitnou a užitkovou vodou
	2.2 Zabezpečení a správa objemu povrchových a podzemních vod
	2.3 Systém odpadních vod
3 Potravinářství a zemědělství	3.1 Produkce potravin
	3.2 Péče o potraviny
	3.3 Zemědělská výroba
4 Zdravotní péče	4.1 Přednemocniční neodkladná péče
	4.2 Nemocniční péče
	4.3 Ochrana veřejného zdraví
	4.4 Distribuce léčiv
5 Doprava	5.1 Silniční
	5.2 Železniční
	5.3 Letecká
	5.4 Vnitrozemská vodní

³ Schváleno při 23. schůzi VCNP dne 23.3.2004, usnesení č. 190.

6 Komunikační a informační systémy	6.1 Služby pevných telekomunikačních sítí
	6.2 Služby mobilních telekomunikačních sítí
	6.3 Radiová komunikace a navigace
	6.4 Satelitní komunikace
	6.5. Televizní a rádiové vysílání
	6.6. Přístup k internetu a k datovým službám
	6.7. Poštovní a kurýrní služby
7 Bankovní a finanční sektor	7.1. Správa veřejných financí
	7.2. Bankovníctví
	7.3. Pojišťovnictví
	7.4. Kapitálový trh
8 Nouzové služby	8.1 Policie (vnitřní bezpečnost a veřejný pořádek)
	8.2 Hasičské záchranné sbory
	8.3 Zdravotnické záchranné služby
	8.4 Letecká zdravotnická záchranná služba
	8.5 Armáda ČR
	8.6 Radiační monitorování vč. doporučení ochranných opatření
	8.7. Předpovědní, varovná a hlásná služba
9 Veřejná správa	9.1 Sociální ochrana a zaměstnanost (sociální zabezpečení, státní sociální podpora, sociální pomoc)
	9.2. Diplomacie
	9.3. Výkon justice a vězeňství
	9.4. Státní správa a samospráva
10 Odpadové hospodářství	10.1 Nakládání s odpady
	10.2 Radioaktivní odpady

Národní kritickou infrastrukturu ČR lze tedy chápat jako systém, který je tvořen dvěma úrovněmi - úrovní sektorů a úrovní produktů a služeb, přičemž jednotlivé prvky kritické infrastruktury na úrovni produktů jsou v této práci nazývány segmenty kritické infrastruktury.

Definovanými příčinami, které mohou narušit funkčnost sektorů a segmentů kritické infrastruktury se rozumí jednotlivé druhy ohrožení uvedené v tab. 2.

Tab. 2: Druhy ohrožení

No.	Druh ohrožení
1	dlouhodobá inverzní situace
2	povodně velkého rozsahu
3	jiné živelní pohromy velkého rozsahu (kromě 1 a 2), jako např. rozsáhlé lesní požáry, sněhové kalamity, vichřice, sesuvy půdy, zemětřesení apod.
4	epidemie - hromadné nákazy osob (včetně hygienických a dalších režimů)
5	epifytie - hromadné nákazy polních kultur (včetně hygienických a dalších režimů)
6	epizootie - hromadné nákazy zvířat (včetně hygienických a dalších režimů)
7	radiační havárie
8	havárie velkého rozsahu, způsobená vybranými nebezpečnými chemickými látkami a chemickými přípravky
9	jiné technické a technologické havárie velkého rozsahu - požáry, exploze, destrukce nadzemních a podzemních částí staveb
10	narušení hrází významných vodohospodářských děl se vznikem rozsáhlé povodně
11	znečištění vody, ovzduší a přírodního prostředí haváriemi velkého rozsahu
12	narušení finančního a devizového hospodářství státu velkého rozsahu

13	narušení dodávek ropy a ropných produktů velkého rozsahu
14	narušení dodávek elektrické energie, plynu nebo tepelné energie velkého rozsahu
15	narušení dodávek potravin velkého rozsahu
16	narušení dodávek pitné vody velkého rozsahu
17	narušení dodávek léčiv a zdravotnického materiálu velkého rozsahu
18	narušení funkčnosti dopravní soustavy velkého rozsahu
19	narušení funkčnosti veřejných telekomunikačních vazeb velkého rozsahu
20	narušení funkčnosti veřejných informačních vazeb velkého rozsahu
21	migrační vlny velkého rozsahu
22	hromadné postižení osob mimo epidemií - řešení následků včetně hygienických a dalších režimů
23	narušení zákonnosti velkého rozsahu

Z uvedeného seznamu je zřejmé, že některá ohrožení vyplývají ze situací, které nejsou bezprostředně ovlivnitelné činnostmi některého ze segmentů uvedených v tab. 1 (živelní pohromy, nákazy, migrace, ...). Jiná ohrožení jsou přímo definována jako narušení funkčnosti segmentů bez ohledu na to, že může být způsobeno jiným ohrožením nebo kombinací několika druhů ohrožení. Např. narušení dodávek léčiv a zdravotnického materiálu může být důsledkem narušení funkčnosti dopravní soustavy, ke kterému došlo živelní událostí nebo narušením dodávek ropy a ropných produktů, resp. vlivem epidemií.

Je zřejmé, že u značného počtu druhů ohrožení lze nalézt podobnou strukturu kauzálních a logických (AND/OR) vazeb. Druhy ohrožení je tedy třeba chápat jako výsledek řady možných scénářů a nelze je bez rozmyslu použít pro hodnocení citlivosti na narušení funkčnosti segmentů kritické infrastruktury. Pro hodnocení citlivosti na narušení funkčnosti lze využít jen ty druhy ohrožení, které nejsou bezprostředně způsobené disfunkcí segmentů kritické infrastruktury. Tyto druhy ohrožení budou dále nazývány primárními druhy ohrožení a jejich seznam je uveden v tab. 3.

Tab. 3: Primární druhy ohrožení

No.	Druh ohrožení
1	dlouhodobá inverzní situace
2	povodně velkého rozsahu
3	jiné živelní pohromy velkého rozsahu (kromě 1 a 2), jako např. rozsáhlé lesní požáry, sněhové kalamity, vichřice, sesuvy půdy, zemětřesení apod.
4	epidemie - hromadné nákazy osob (včetně hygienických a dalších režimů)
5	epifytie - hromadné nákazy polních kultur (včetně hygienických a dalších režimů)
6	epizootie - hromadné nákazy zvířat (včetně hygienických a dalších režimů)
7	radiační havárie
8	havárie velkého rozsahu, způsobená vybranými nebezpečnými chemickými látkami a chemickými přípravky
9	jiné technické a technologické havárie velkého rozsahu - požáry, exploze, destrukce nadzemních a podzemních částí staveb
10	narušení hrází významných vodohospodářských děl se vznikem rozsáhlé povodně
11	znečištění vody, ovzduší a přírodního prostředí haváriemi velkého rozsahu
21	migrační vlny velkého rozsahu
22	hromadné postižení osob mimo epidemií - řešení následků včetně hygienických a dalších režimů

Při rozhodování o prioritách při zvyšování odolnosti infrastruktury hraje významnou roli otázka důležitosti příslušné oblasti (segmentu) kritické infrastruktury. Jak stanovit, který z výše uvedených segmentů infrastruktury je důležitější? Evidentně to záleží na mnoha podmínkách (mírová situace, stav válečného ohrožení, ...) a úrovních, na kterých se důležitost posuzuje (úroveň státu, kraje, obce). Tomuto hodnocení se formou zkoumání kritičnosti věnuje značná pozornost. To se projevuje v množství dlouhodobých mezinárodních projektů Evropské unie věnovaných výzkumu této oblasti. Význačným rysem tohoto výzkumu je multidisciplinární charakter projektů a aplikace fundamentálních postupů z oboru spolehlivosti a řízení rizik. Výsledky zkoumání vazeb mezi jednotlivými segmenty infrastruktury a důsledky jejich narušení jsou prezentovány např. v [2, 3].

V rámci Evropského společenství jsou pro identifikaci potenciální kritické infrastruktury navrženy následující faktory.

- Rozsah - velikost ztráty prvku kritické infrastruktury je dána rozlohou geografické oblasti, která může být zasažena touto ztrátou nebo výpadkem - mezinárodní, národní, regionální či místní.
- Důležitost - stupeň důsledku či poškození může být stanoven jako žádný, minimální, mírný nebo významný. Mezi kriteria stanovující potenciální důležitost patří [3]:
 - a) veřejný dopad (množství postiženého obyvatelstva, ztráty na životě, poškození zdraví, vážná zranění, evakuace),
 - b) ekonomika (vliv na HDP, rozsah ekonomické ztráty a/nebo poškození statků a služeb),
 - c) životní prostředí (dopad na přilehlou oblast),
 - d) vzájemná propojenost (s ostatními prvky kritické infrastruktury),
 - e) politická kriteria (důvěra ve schopnost vlády).
- Vliv času - toto kritérium udává do jaké doby po kolizi prvku infrastruktury bude následovat jeho vážný dopad (okamžitý, do 24 - 48 hodin, do jednoho týdne, jinak).

Tyto faktory je při hodnocení kritické infrastruktury a její citlivosti na narušení funkčnosti jednotlivých segmentů třeba respektovat.

3 PŘÍSTUP K HODNOCENÍ KRITICKÉ INFRASTRUKTURY

Zřetelně se ukazuje, že složitost řešené problematiky způsobuje problémy při čistě analytickém přístupu. Je to způsobeno jednak složitostí a množstvím vazeb a dále jejich proměnlivostí. Po časově náročném analytickém stanovení kritičnosti lze mnohdy konstatovat, že úloha je vyřešena, ale popisovaný stav je minulostí. Proto je třeba volit jiné metody, založené na expertním přístupu. Ty by umožnily rychle shromažďovat a vyhodnocovat potřebné informace a dávaly představu o kritičnosti jednotlivých segmentů kritické infrastruktury v různých úhlech a úrovních pohledu.

Na základě těchto skutečností proto navrhovaný způsob hodnocení vychází z následujících předpokladů.

- Kritickou infrastrukturu je třeba zvažovat jako celek ve vzájemných souvislostech. Jednotlivé sektory a segmenty kritické infrastruktury nelze hodnotit izolovaně bez ohledu na ostatní sektory a segmenty.

- Hodnocení důležitosti kritické infrastruktury, resp. jejích částí (sektorů, segmentů) se mění v závislosti na:
 - způsobu narušení její funkce a podle účelu, ke kterému je hodnocení využito,
 - územním rozsahu, pro které je hodnocení využito,
 - časové dynamice odezvy kritické infrastruktury na narušení.
- Hodnocení kritické infrastruktury v komplexním měřítku nelze provést analyticky z těchto důvodů:
 - postihnout analyticky značné množství vztahů klade značné nároky na informační zdroje a vyžaduje nasazení mnoha analytických týmů (při N segmentech se zkoumají vazby pro $N \times (N - 1)$ úrovní vztahů),
 - časová náročnost analytického procesu vede k tomu, že může být vyhodnocena „minulost“ kritické infrastruktury a hodnocení nepostihuje aktuální stav kritické infrastruktury a dynamický vývoj situace - zhoršující, zlepšující.

Pro hodnocení kritické infrastruktury je tedy třeba dát přednost jiným přístupům a vytvořit postupy s dostatečnou mírou obecnosti, která umožní:

- vytvořit dostatečně **obecný a jednotný** model hodnocení pro všechny segmenty kritické infrastruktury,
- umožnit změnu „optiky“ v modelu hodnocení při změně úrovně rozlišení kritické infrastruktury (stát - kraj - lokalita) a zvolenou okrajovou podmínku (způsob narušení, účel hodnocení).

K tomu to účelu se jako vhodné a časově efektivní řešení jeví využití expertního hodnocení následků při narušení vazeb mezi segmenty a jejich znázornění pomocí matic kritičnosti. Pro vlastní vyhodnocení lze pak využít vhodného softwarové prostředku, který by umožnil efektivní zpracování výsledků expertního hodnocení.

Obdobně jako se u hodnocení rizik technických systémů používá matice kritičnosti (resp. matice rizika) spojené s hodnocením pravděpodobnosti a následků selhání systému, nabízí se možnost posuzovat segmenty kritické infrastruktury na základě analogického přístupu.

3.1 Matice kritičnosti

V oboru spolehlivosti a analýze rizik je běžně využíváno hodnocení pomocí tzv. matice kritičnosti. Nejedná se o matici známou z matematiky, ale o vyjádření vztahu dvou veličin formou tabulky. Klasickou ukázkou hodnocení rizika v matici kritičnosti je příklad na obr. 1. Uvedená matice rizika obsahuje kvalitativní hodnocení rizika. Pro kvantitativní hodnocení postačuje dosadit konkrétní hodnotu pravděpodobnosti a jejich následků. Hodnota rizika je pak reprezentována součinem hodnoty pravděpodobnosti a hodnoty následku. Matice kritičnosti tedy umožňuje jednoduše hodnotit kritičnost analyzovaného jevu z hlediska rizika.

		Třída kritičnosti				
		N	V	E	X	X
Pravděpodobnost	Vysoká	N	V	E	X	X
	Střední	N	S	V	E	X
	Nizká	Z	N	S	V	E
	Zanedbatelná	Z	Z	N	S	V
		Nepatrné	Malé	Střední	Velké	Rozsáhlé
Následky						

Třída kritičnosti: X = netolerovatelné S = střední
E = extrémní N = nízké
V = vysoké Z = zanedbatelné

Obr. 1: Matice kritičnosti při hodnocení rizika

Analýza rizik využívá některé z metod používaných v oboru spolehlivosti k analýze složitých systémů. Pro analýzu kritičnosti se zpravidla aplikuje analýza druhů a důsledků poruchových stavů (FMECA), viz [4]. Tuto metodu lze přizpůsobit a využít k hodnocení i netechnických systémů, tedy i k hodnocení kritické infrastruktury.

Analogii v řešení problému lze dokumentovat na zjednodušené ukázce hodnocení důsledku ztráty funkce jednoho segmentu kritické infrastruktury pro jiný (resp. jiné) segmenty. Parametry, které charakterizují důsledky ztráty funkce segmentu jsou závažnost ztráty funkce (tj. následky pro jiný segment) a doba ztráty funkce. Závažnost ztráty funkce je hodnocena např. expertním odhadem ve škále hodnot v rozmezí 0 až 10. Doba ztráty funkce je vyjádřena v hodinách. Z těchto dvou parametrů lze sestavit matici, viz obr. 2, která je analogií matice kritičnosti z obr. 1.

		Třída kritičnosti				
		N	V	E	X	X
Doba ztráty funkce [h]	1000	N	V	E	X	X
	100	N	S	V	E	X
	10	Z	N	S	V	E
	1	Z	Z	N	S	V
		0 - 2	3 - 4	5 - 6	7 - 8	9 - 10
Závažnost ztráty funkce [1]						

Obr. 2: Matice kritičnosti při hodnocení ztráty funkce segmentu kritické infrastruktury

Hodnocení kritičnosti segmentů kritické infrastruktury je základem pro stanovení citlivosti segmentů na narušení funkčnosti jiných segmentů.

3.2 Způsob hodnocení kritické infrastruktury

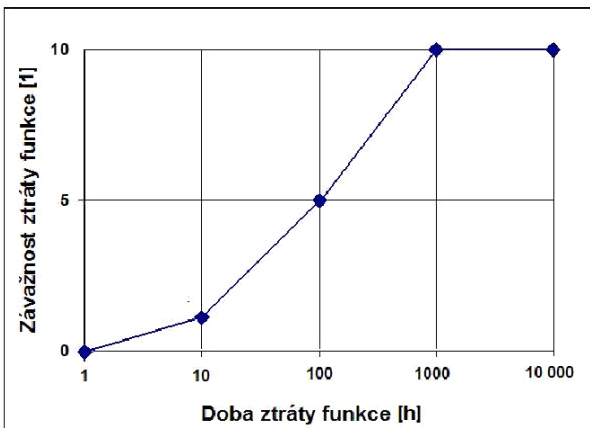
Základem hodnocení⁴ je expertní posouzení citlivosti segmentu na narušení funkčnosti segmentů v dynamické matici kritičnosti. Podstatou hodnocení je ocenění závažnosti ztráty funkce segmentu v závislosti na čase (proto označení dynamická matice) ve škále hodnot, např. v rozmezí 0 až 10. Princip hodnocení je zřejmý z obr. 3, který popisuje případ závislosti segmentu dopravní infrastruktura na bankovním segmentu. Hodnotí tedy citlivost segmentu dopravní infrastruktura na ztrátu funkčnosti bankovního segmentu. Neuvažuje však schopnost obnovy funkce bankovního segmentu, či možnost vytvoření náhradních vazeb. Praxi bližší bude zřejmě hodnocení citlivosti uvedené na obr. 4, které respektuje schopnost obnovy segmentu.

Graf na obr. 3 a 4 je pouze grafickou interpretací expertního hodnocení kritičnosti bankovního segmentu v dynamické matici kritičnosti pro vyhodnocení citlivosti segmentu dopravní infrastruktury na narušení funkce bankovního segmentu.

Na obr. 5 je pak uveden příklad komplexního posouzení vyhodnocení citlivosti segmentu dopravní infrastruktury na narušení funkce ostatních segmentů kritické infrastruktury. Jedná se tedy o hodnocení z úrovně jednoho segmentu.

Obr. 6 pak představuje výsledné hodnocení citlivosti (důležitosti, kritičnosti) segmentů národní infrastruktury. Je superpozicí hodnocení citlivosti jednotlivých segmentů národní infrastruktury.

Dopravní infrastruktura vs. bankovní segment



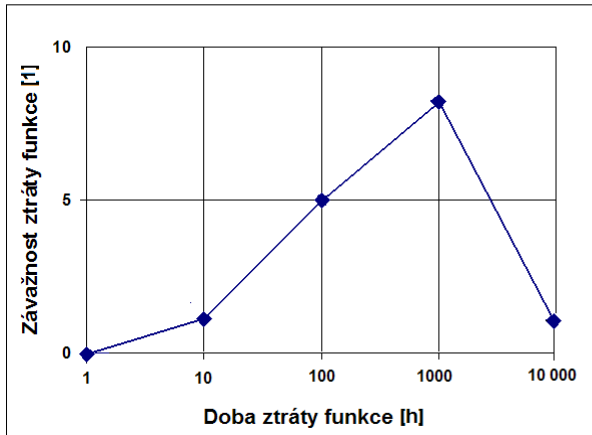
T	Bankovní segment
1h	0
10h (směna)	1
100h (4 dny)	5
1000h (> 1 měsíc)	10
10 000h (> 1 rok)	10
Celkem	26

- 0 ... bankovní služby nejsou potřebné
- 1 ... nelze vyúčtovat tržby za směnu
- 5 ... nelze realizovat platby za nákup a prodej
- 10 ... zhroutení systému

Obr. 3: Dynamická matice kritičnosti bez korekce obnovou

⁴ Při výkladu principů postupu hodnocené kritičnosti není pro zjednodušení výkladu respektována terminologie označení segmentů kritické infrastruktury uvedená v tab. 1.

Dopravní infrastruktura vs. bankovní segment



T	Bankovní segment
1h	0
10h (směna)	1
100h (4 dny)	5
1000h (> 1 měsíc)	8
10 000h (> 1 rok)	1
Celkem	15

- 0 ... bankovní služby nejsou potřebné
- 1 ... nelze vyúčtovat tržby za směnu
- 5 ... nelze realizovat platby za nákup a prodej
- 8 ... nefunkční platební styk na dosavadních principech, přechod na hotovostní platby
- 1 ... přechod na jiný způsob finančního oběhu, resp. návrat k původnímu stavu

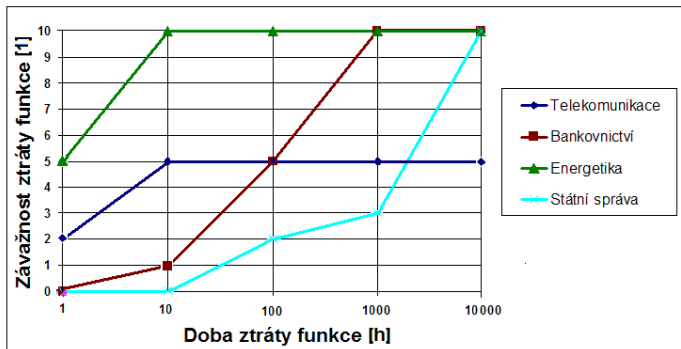
Obr. 4: Dynamická matice kritičností s korekcí obnovou

DI vs. ostatní segmenty	Telekomunikace	Bankovníctví	Energetika	Státní správa	...	Σ
1h	2	0	5	0	...	7
10h	5	1	10	0	...	16
100h	5	5	10	2	...	22
1000h	5	10	10	3	...	28
10 000h	5	10	10	10	...	35
Σ	22	26	45	15	...	108

Stabilita v čase

Udává míru nezávislosti segmentu

Důležitost segmentů



Základní informační výstupy

- důležitost jednotlivých segmentů krit. infrastruktury (závažnost ztráty jejich funkce) pro dopravní infrastrukturu v jednotlivých časových rovinách
- časová stabilita dopravní infrastruktury
- míra (ne)závislosti dopravní infrastruktury

Pro N segmentů kritické infrastruktury je potřeba N matic citlivosti

Obr. 5: Příklad hodnocení na úrovni segmentu kritické infrastruktury

	Doprava		Telekomunikace		Bankovnictví		Energetika		Státní správa		...		Σ	
	Total	Rel.[%]	Total	Rel.[%]	Total	Rel.[%]	Total	Rel.[%]	Total	Rel.[%]	...	...	Total	Rel.[%]
1h	7										...	...
10h	16										...	...
100h	22										...	...
1000h	28										...	...
10 000h	35										...	...
Σ	108										...	...

Suma N-1 vazeb celkem (důležitost segmentů krit. infrastruktury absolutně)
Suma N-1 vazeb pro 10 000h

Důležitost segmentů krit. infrastruktury relativně

Základní informační výstupy

- důležitost jednotlivých segmentů v rámci kritické infrastruktury jako celku (v jednotlivých časových rovinách)
- časová stabilita kritické infrastruktury

Obr. 6: Příklad hodnocení na úrovni kritické infrastruktury jako celku

Je zřejmé, že navržený způsob hodnocení kritické infrastruktury splňuje požadavky na srozumitelné a relativně jednoduché ocenění důležitosti segmentů kritické infrastruktury na základě expertního úsudku. Hodnocení je při softwarové podpoře zvládnutelné v přiměřeném čase. Prostou změnou pohledu experta (při změně rozlišení či zvolené podmínce) se dle potřeby změní i hodnocení vazeb, citlivosti a důležitosti segmentů kritické infrastruktury.

V prezentovaném přístupu byla pro jeho lepší srozumitelnost použita některá zjednodušení. Závažnost ztráty funkce byla hodnocena bodovou škálou v rozmezí 0 až 10 bodů, které charakterizuje ztrátu funkčnosti segmentu vlivem výpadku jiného segmentu. Bodová hodnota by měla přibližně odpovídat procentuální ztrátě funkčnosti segmentu (0 - bez vlivu na funkci segmentu, 1 - omezení funkčnosti do 10%, 2 - omezení funkčnosti do 20%, ..., 9 - omezení funkčnosti do 90%, 10 - úplná ztráta funkčnosti segmentu).

Hodnoty na časové ose byly odstupňovány v řádech a začínaly od hodnoty 1 h. Při reálné aplikaci bude zřejmě třeba na základě nabytých zkušeností provést změny hodnot bodové škály, pokud bodové rozmezí se projeví jako úzké. Na časové ose bude zcela jistě třeba začínat o řád níže, tj. od 0,1 h. Je to dáno dynamikou „rychlých“ segmentů, mezi které lze nepochybně řadit segment 1.1 (elektřina) a zřejmě i segmenty 6.1 až 6.6 (služby telekomunikačních sítí).

4 ZÁVĚR

Z uvedeného příspěvku je zřejmé, že analytické nástroje a postupy používané při analýzách spolehlivosti a rizika technických systémů lze aplikovat i na jiné systémy. Zkoumání vazeb, vztahů a časové dynamiky změn parametrů systémů je natolik obecnou záležitostí, že není principiálního rozdílu v tom, zda jsou aplikovány na ten či onen systém.

LITERATURA

- [1] KOPECKÝ, Z.: Kritická infrastruktura a kritické prvky infrastruktury. In.: 8. mezinárodní vědecká konference “Riešenie krizových situácií v špecifickom prostredí”. Žilinská univerzita v Žilině 2003, 6 s., ISBN 80-8070-090-7.

- [2] Critical Infrastructure Protection in The Netherlands. Ministry of the Interior and Kingdom Relations The Netherlands. April 2003.
- [3] LUIIJF, E. - BURGER, H. - KLAVER, M.: Critical Infrastructure Protection in The Netherlands: A Quick-scan. In: EICAR Conference Best Paper Proceedings. ISBN: 87-987271-2-5.
- [4] ČSN IEC 60812 Metody analýzy spolehlivosti systému. Postup analýzy způsobů a důsledků poruch (FMEA).

Poděkování

Tato práce byla vytvořena s finanční podporou Ministerstva dopravy České republiky, projekt číslo 1F44E/015/030 „Dopravní infrastruktura jako kritický prvek Národní infrastruktury z hlediska zabezpečení základních funkcí státu“.