

TECHNICKÁ UNIVERZITA
V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií

POSTUPY SEMIKVANTITATIVNÍ ANALÝZY FMECA

Disertační práce

Vypracoval:

Ing. Jaroslav Zajíček

Školitel:

Doc. RNDr. Miroslav Koucký, CSc.



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména §60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací se školitelem disertační práce.

Datum:

Podpis



Poděkování

Poděkování patří především školiteli disertační práce Doc. RNDr. Miroslavu Kouckému, CSc. za příkladné vedení, konzultace k dané problematice a konstruktivní připomínky k formální i odborné stránce samotného textu. Dále děkuji Ing. Pavlu Fuchsovi, CSc. za předání cenných zkušeností z průmyslové praxe v problematice spolehlivosti a rizika.



Anotace

FMECA (Analýza druhů, důsledků a kritičnosti poruchových stavů) je spolehlivostní analýza, která je detailně popsána například v mezinárodní normě EN 60812:2006. Hodnocení kritičnosti poruchových stavů je založené na semikvantitativním přístupu. Kritičnost neboli riziko je nepřímo vyjádřeno pomocí bezrozměrného rizikového čísla *RPN* (Risk Priority Number). *RPN* primárně slouží k sestupnému seřazení hodnocených poruchových stavů (nebo obecněji nežádoucích událostí). Semikvantitativní přístup je vhodný především v případech, kdy pro požadovaná vstupní kritéria (pravděpodobnost, odhalitelnost a následky poruchového stavu) nejsou k dispozici konkrétní hodnoty či provozní data. Podstata hodnocení spočívá ve vytvoření hodnotících stupnic, pomocí kterých je vstupním kritériím přiřazeno bodové ohodnocení. Součinem bodových ohodnocení jednotlivých vstupů je získáno rizikové číslo *RPN*.

V některých odborných člancích jsou zmínky o slabých místech metody FMECA, a to především ve způsobu výpočtu rizikového čísla *RPN*. Součin pravděpodobnosti, odhalitelnosti a následků je jistě vhodný pro kvantitativní vyčíslení rizika, kdy pravděpodobnost i odhalitelnost poruchového stavu jsou vyjádřeny pomocí pravděpodobnosti v intervalu $< 0; 1 >$ a následky poruchového stavu pak například vyčísleny finančně. Zodpovězení otázky, zda je použití součinu vhodné i pro semikvantitativní hodnocení, je motivací této práce.

Disertační práce obsahuje, kromě detailního popisu metody FMECA a formulace problémů z odborné literatury, především analýzu korektnosti stávajícího výpočtu rizikového čísla. Na základě výsledků této analýzy je navržen obecný postup pro návrh výpočtu, který respektuje strukturu hodnotících stupnic. Konkrétní výpočet rizikového čísla je pak navržen pro hodnotící bodové stupnice uvedené v normách ČSN EN 60812:2006 a VDA-Vol4. Nově je možné zjistit i výsledné rizikové číslo komponenty nebo libovolné vyšší úrovně členění systému, což umožňuje mezi sebou porovnávat nejen samotné poruchové stavy.

Dílními přínosy práce jdou dále popisy využití konstrukčního i funkčního členění v analýzách FMEA a FMECA, výpočet průměrné relativní chyby výsledného rizika při semikvantitativním hodnocení oproti plně kvantitativnímu přístupu a posouzení začlenění metody FMECA do struktury norem.



Abstract

FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis) is dependability analysis. It is described in detail in the international standard EN 60812:2006, Czech conversion title is ČSN EN 60812:2006. Criticality classification of failure modes is based on semi-quantitative approach. The criticality (or risk) is indirectly expressed by non-dimensional number *RPN* (Risk Priority Number). The main target of *RPN* is to order analyzed failure modes (or undesirable events generally) according to the criticality (risk). Semi-quantitative approach is appropriate especially in cases where the specific values or generic data are not available for the required entry criteria (probability, detectability and consequences of the failure mode). The base is to create the scales made for assigning the values to entry criteria. *RPN* is obtained by multiplying the values of entry criteria.

In some papers the weak points of FMECA method have been mentioned, especially the *RPN* evaluation. The product of the probability, detectability and consequences is certainly suitable for quantitative risk analysis where probability and detectability are expressed by using probability in the interval $< 0; 1 >$ and the consequences of the failure mode is quantified financially. Answering the question whether the usage of the product is suitable for semi-quantitative evaluation is the motivation of this work.

Doctoral thesis contains, in addition to detailed description of the method FMECA and formulation of problems from literature, the analysis of the current calculation of the *RPN*. The general procedure is proposed on the basis of the analysis results and it respects the scales structures. Specific *RPN* calculation is designed for the point scales in EN 60812:2006 and VDA-Vol4 standards. Newly, *RPN* of any component, subsystem or system (not only for failure mode) can be evaluated and compared.

Partial contributions are a description of the constructional and functional decomposition using, average relative error evaluation of resulting risk from semi-quantitative analysis compared to full quantitative risk evaluation and appreciation of FMECA in standards structure.



Obsah

1.	Úvod.....	9
1.1	Motivace pro analýzu FMECA	9
1.2	Další analýzy spolehlivosti	9
1.3	Cíle disertace	14
2.	FMEA/FMECA	15
2.1	Normy, standardní postupy	15
2.1.1	Kvalitativní analýza.....	20
2.1.2	Kvantitativní analýza.....	20
2.1.3	Semikvantitativní analýza	22
2.1.4	Softwarové nástroje	27
2.1.5	Formulář a schéma postupu analýzy	30
2.2	Rešerše odborných publikací.....	33
2.3	Analýzy FMECA v průmyslovém prostředí	36
3.	Modifikace FMECA - řešení	38
3.1	Hodnocené faktory	38
3.2	Hodnotící stupnice	38
3.3	Analýza stávajících postupů	42
3.3.1	Analýza postupu hodnocení pomocí <i>RPN</i>	43
3.3.2	Analýza postupu hodnocení pomocí matice kritičnosti.....	48
3.4	Metodika výpočtu výsledného rizikového čísla.....	49
3.5	Porovnání stávajících a doporučených postupů	53
3.6	Určení průměrné chyby od plně kvantitativního přístupu	54
3.6.1	Chyba v hodnocení jednoho faktoru	54
3.6.2	Chyba v celkovém vyhodnocení dle VDA-Vol4	56
3.7	Případová studie - porovnání postupů	59
3.8	Návrh vícefaktorového modelu	60
3.8.1	Popis systému	61
3.8.2	Hodnotící stupnice.....	63
3.8.3	Výpočet výsledného rizikového čísla/rizika.....	69
3.8.4	Kombinace semikvantitativních a kvantitativních vstupů.....	72
3.8.5	Typy dílčího vyhodnocení	73
3.8.6	Příklad hodnocení objektů	73
4.	Začlenění metody FMECA do struktury norem	77
5.	Závěr.....	78
	Literatura.....	79
	Vybrané publikace autora	80
	Příloha 1: Hodnotící stupnice analýz FMECA	85
	Příloha 2: Zdrojové kódy Matlab	102



Seznam zkratek

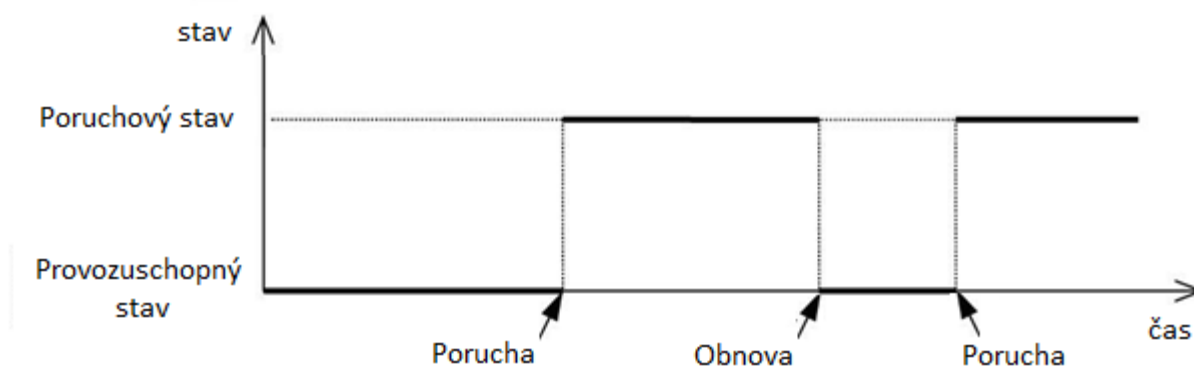
ETA	Analýza stromem událostí (Event Tree Analysis).
FMEA	Analýza druhů poruchových stavů a jejich důsledků. V některé literatuře je označována jako „Analýza způsobů a důsledků poruch“ z anglického „Failure Mode and Effects Analysis“.
FMECA	Analýza druhů, důsledků a kritičnosti poruchových stavů. V některé literatuře je označována jako „Analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch“ z anglického „Failure Mode, Effects and Criticality Analysis“.
FTA	Analýza stromu poruchových stavů (Fault Tree Analysis).
MA	Markovova analýza (Markov Analysis).
PC	Metoda výpočtu bezporuchovosti z dílů (Parts Count).
RBD	Metoda blokových diagramů bezporuchovosti (Reliability Block Diagram).
RPN	Číslo priority rizika z anglického „Risk Priority Number“, v textu níže je použito slovní spojení „rizikové číslo“.

Definice, použité pojmy

Porucha	Ukončení schopnosti objektu plnit požadovanou funkci.
Poruchový stav	Stav objektu charakterizovaný neschopností plnit požadovanou funkci, kromě neschopnosti během preventivní údržby nebo jiných plánovaných činností nebo neschopnosti způsobené nedostatkem vnějších zdrojů.

Pozn.: Rozdíl mezi poruchou a poruchovým stavem je jasně patrný z tzv. prostého procesu obnovy (obr. 1). Objekt se vyskytuje buď v provozuschopném stavu, nebo ve stavu poruchovém, pomocí jevů porucha a obnova tyto stavy objekt mění.

Výše uvedený popis a obrázek se vztahují k dvoustavovému systému. Existují i vícestavové systémy, které mohou být kromě poruchového a provozuschopného stavu i v tzv. stavech degradačních, kdy je požadovaná funkce zajištěna pouze z části.



Obr. 1: Prostý proces obnovy

Klíčová slova

Analýza FMECA, Risk Priority Number, RPN, semikvantitativní analýza, semikvantitativní hodnocení, hodnotící stupnice.



1. Úvod

O problematiku spolehlivosti výrobků/systémů se v současné době musí zajímat většina firem, které chtějí být konkurenceschopné na trhu. Spolehlivost (obecná vlastnost objektu spočívající ve schopnosti plnit požadovanou funkci) se hodnotí jak v etapě návrhu, vývoje, výroby, tak především v době používání, kdy se data sbírají zpětně od zákazníků/provozovatelů a ze záručních i pozáručních oprav. Ke stanovení spolehlivosti, kvantifikované pomocí ukazatelů bezporuchovosti, pohotovosti a udržitelnosti, se používají různé matematické nástroje, vycházející z teorie pravděpodobnosti, matematické statistiky či diskrétní matematiky, přičemž každý z nich je vhodný pro jiný typ objektu a jeho etapu života.

Disertační práce je zaměřena na jednu ze základních a v průmyslu často používaných metod analýz spolehlivosti – metodu FMECA.

1.1 Motivace pro analýzu FMECA

Cílem disertační práce je kritické posouzení korektnosti některých současných postupů popsaných v normách, v odborných člancích a zakomponovaných v komerčních softwarech. Na základě tohoto posouzení jsou navrženy postupy alternativní.

Navržené zobecněné postupy jsou aplikovány na reálných příkladech a dále slouží pro vytvoření modelu hodnocení dopravní infrastruktury jako kritického prvku národní infrastruktury. Požadavek na tento model vzneslo Ministerstvo dopravy ČR.

1.2 Další analýzy spolehlivosti

Teorie spolehlivosti disponuje různými metodami hodnocení spolehlivosti systémů. Pomocí nich se predikují ukazatele bezporuchovosti nebo identifikují kritická místa systému, na která je pak možné aplikovat nápravná opatření. Obecně lze analýzy spolehlivosti dělit na základě mnoha kritérií. Dělí se dle vhodnosti použití v jednotlivých etapách životního cyklu objektu, podle toho, zda jsou využity pravděpodobnosti nastoupení poruchy nebo je přístup deterministický atd.

Etapy životního cyklu objektu:

- etapa koncepce a stanovení požadavků,
- etapa návrhu a vývoje,
- etapa instalace,
- etapa výroby,
- etapa provozu a údržby,
- etapa vypořádání (likvidace).

Jednotlivé analýzy spolehlivosti se liší v požadovaných vstupních datech a pochopitelně i ve vlastních výstupech. Dostupnost vstupních dat částečně souvisí s etapou životního cyklu, ve které se produkt nachází, proto jsou některé analýzy spolehlivosti vhodné pouze k určitým etapám životního cyklu. V raných etapách (koncepce a stanovení požadavků, návrh a vývoj) nejsou k dispozici statistická data o provozu konkrétního objektu, a proto jsou vstupními daty často hodnoty z databází spolehlivosti, odhady expertů či data z provozu konstrukčně i funkčně obdobných objektů. V případech, kdy neumíme predikovat projevy poruch systému na základě poruchových stavů jednotlivých komponent, se konzervativně uvažuje tzv. sériový spolehlivostní model.

Pozn.: Sériový spolehlivostní model je blokové zapojení objektů, kdy poruchový stav libovolného objektu způsobí poruchu systému.



Obr. 2: Sériový spolehlivostní model

Pro pravděpodobnost $R_{systém}(t)$, že sériový systém přežije dobu t , platí vztah:

$$R_{systém}(t) = R_1(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$



a pro okamžitou intenzitu poruchy $\lambda_{systém}(t)$, dostáváme vztah:

$$\lambda_{systém}(t) = \lambda_1(t) + \dots + \lambda_n(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t)$$

kde $R_{systém}(t), R_i(t)$ je pravděpodobnost bezporuchového provozu¹

$\lambda_{systém}(t), \lambda_i(t)$ je okamžitá intenzita poruch $[h^{-1}]^2$

Během etapy výroby a etapy provozu a údržby již lze zpracovávat i vlastní provozní data.

Dělení analýz spolehlivosti dle využití pravděpodobnosti nastoupení poruchy

- pravděpodobnostní,
- deterministické.

Deterministické postupy nevyužívají k popisu teorii pravděpodobnosti, ale popisují statickou strukturu, která nepodléhá náhodným poruchám. Takto definovanými modely se zabývají oblasti diskrétní matematiky, teorie grafů, spolehlivosti sítí apod. Deterministické postupy jsou vhodné v situacích, kdy se analyzuje vliv poruchy určité pevně zvolené komponenty systému (případně kombinace poruch více komponent) na funkci celého systému tzv. analýza zranitelnosti (vulnerability).

Pravděpodobnostní postupy využívají pro popis systému teorii pravděpodobnosti. Předpokládá se, že poruchy komponent vznikají náhodně v čase, tedy kromě technologických parametrů, způsobů poruch a definice jejich následků je každé komponentě systému přiřazeno i rozdělení pravděpodobnosti doby do poruchy, resp. doby do obnovy nebo jiný vhodný ukazatel.

¹ Jedná se o podmíněnou pravděpodobnost, že objekt v čase t je v bezporuchovém stavu, za předpokladu, že v čase $t = 0$ byl též v bezporuchovém stavu. $R(t)$ lze alternativně značit jako $R(0, t)$.

² Intenzita poruch je limita, existuje-li, podílu podmíněné pravděpodobnosti, že časový okamžik vzniku poruchy objektu leží v daném časovém intervalu $< t, t + \Delta t$, a doby trvání Δt tohoto časového intervalu, když se Δt blíží k nule, za podmínky, že do začátku časového intervalu objekt neměl poruchu [3].

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t+\Delta t) - F(t)}{R(t) \cdot \Delta t} = \frac{f(t)}{R(t)}, \text{ kde } F(t) = 1 - R(t)$$



Dělení dle směru analýzy („myšlení“)

- induktivní,
- deduktivní.

Induktivní postup je založen na provádění analýzy od specifických a elementárních problémů k obecnějším a globálnějším. Od identifikace funkcí a způsobů poruch prvků (a jejich kombinací) na nejnižší úrovni členění systému se postupuje k analýze důsledků poruch na nadřazené systémy a to až k poruchám celého systému.

Deduktivní postup je založen na provádění analýzy od globálních problémů k problémům elementárním. Od identifikace způsobů poruch systému na nejvyšší úrovni členění se postupuje k analýze jejich příčin a podílu poruch elementárních prvků na těchto poruchách.

Dělení analýz dle ohodnocení pravděpodobnosti a následků poruch

- kvalitativní,
- semikvantitativní,
- kvantitativní.

Obecně lze kvalitativní ohodnocení dále rozdělit na ohodnocení nominální a ordinální, kvantitativní (kardinální) pak na intervalové a poměrové. Nominální proměnná je taková, o jejíchž dvou hodnotách můžeme pouze říci, zda jsou stejné či různé (např. způsoby poruchy). Lze u nich zjišťovat jen rozdělení četností, nemůžeme provádět aritmetické operace. U dvou ordinálních hodnot můžeme navíc určit pořadí (např. pravděpodobnost poruchy „malá“, „střední“ nebo „vysoká“). Intervalová (rozdílová) proměnná je taková, pro jejíž dvě hodnoty můžeme vypočítat, o kolik je jedna hodnota větší (resp. menší) než druhá. U poměrové (podílové) proměnné lze pak vypočítat, kolikrát je jedna hodnota větší (resp. menší) než druhá.

U kvantitativního hodnocení se přiřazují číselné hodnoty veličin, pravděpodobnosti tedy například pravděpodobnost bezporuchového provozu R , následkům například finanční ocenění.

Speciální skupinou jsou analýzy semikvantitativní. Ty namísto hodnocení pomocí číselných hodnot s příslušnou jednotkou odpovídající hodnocenému faktoru pracují se slovními popisy, kterým jsou přiřazené bezrozměrné celočíselné hodnoty ve zvolených stupnicích.



Stupnice mají běžně rozsah 1-5 nebo 1-10 a jedná se o stupnice ordinální. Dle slovních interpretací jednotlivých stupňů je však nelze hromadně označit jako intervalové nebo poměrové, některé z nich nelze jednoznačně zařadit do těchto skupin ani po bližší analýze.

Existují spolehlivostní metody, které lze provádět na úrovni kvalitativní i kvantitativní. Tato úroveň se volí na základě požadavků na výstupy analýz nebo dle dostupnosti vstupních dat. Semikvantitativní přístup je popsán pouze pro metodu FMECA. V současné praxi se při provádění analýz spolehlivosti můžeme setkat zejména s následujícími metodami:

- analýza druhů poruchových stavů a jejich důsledků (FMEA),
- analýza druhů, důsledků a kritičnosti poruchových stavů (FMECA),
- metoda blokových diagramů bezporuchovosti (RBD),
- metoda výpočtu bezporuchovosti z dílů (PC),
- analýza stromem poruchových stavů (FTA), resp. stromem událostí (ETA),
- Markovova analýza (MA),
- statistické metody pro výpočet bezporuchovosti neparametrickými odhady.

Následující tabulka obsahuje přehled základních informací o jednotlivých metodách. Při výběru metody je vhodné zohlednit i počet komponent systému, které budeme analyzovat. Metodami FMEA, FMECA nebo PC lze analyzovat libovolný počet komponent, čas provedení analýz roste přibližně přímo úměrně s počtem komponent. U ostatních z uvedených metod je vhodné zvolit rozumný detail analýzy, aby stromové či diagramové struktury neztrácely na přehlednosti a případný výpočet u kvantitativně prováděných analýz proběhl v rozumně krátkém čase.

Tab. 1: Přehled analýz spolehlivosti

Metoda	Vhodné pro			Symbolická reprezentace	Přístup deduktivní / induktivní
	zálohované struktury	závislé události	strategie údržby		
FMEA	ne	ne	ne	tabulka	induktivní
FMECA	ne	ne	ne	tabulka	induktivní
RBD	ano	ano	ne	blokový diagram	deduktivní
PC	ne	ne	ne	tabulka	induktivní
FTA	ano	ano	ne	strom poruch	deduktivní
ETA	ano	ano	ne	strom událostí	deduktivní
MA	ano	ano	ano	stavový diagram	induktivní



Disertační práce je zaměřena na postupy metod FMEA a FMECA, ty stávající jsou dále podrobně popsány. Popisu ostatních metod nebude věnována pozornost, podrobné informace lze nalézt například v monografii [18].

1.3 Cíle disertace

Hlavním cílem disertační práce je vytvoření metodiky pro výpočet rizikového čísla semikvantitativně prováděné analýzy FMECA a její demonstrace na vhodně zvolených příkladech. Přínosem aplikace analýzy FMECA je především zjištění možných způsobů poruch, jejich příčin a stanovení výsledného rizikového čísla. Identifikované způsoby poruch jsou seřazeny nerostoucím způsobem dle rizikového čísla, přičemž pro všechny poruchové stavy s rizikovým číslem nad akceptovatelnou hranicí³ jsou stanovena nápravná opatření pro jeho snížení nebo pro úplnou eliminaci způsobu poruchy změnou návrhu. Současné postupy neakceptují strukturu bodových stupnic, čímž při vyhodnocení dochází mnohdy ke stanovení rizikového čísla chybně – viz analýza stávajících postupů v kapitole 3.3. Díky tomu mohou nápravná opatření směřovat i na méně významné módy poruch a ty důležité jsou opomenuty. Navržený model je založen na současně používaném semikvantitativním hodnocení, výpočet výsledného rizikového čísla však bude zpracován na principu plně kvantitativního hodnocení s využitím podstaty hodnocených faktorů.

Mezi další cíle patří detailní popsání a vytvoření schématu postupu provádění analýzy FMECA s využitím konstrukčního i funkčního členění systému, výpočet průměrné relativní chyby výsledného rizika při semikvantitativním hodnocení oproti plně kvantitativnímu přístupu a posouzení začlenění metody FMECA do struktury norem.

³ Akceptovatelná hranice rizikového čísla je před začátkem analýzy stanovena analytikem. Například v interním dokumentu VDA-Vol 4, podle kterého se provádí FMEA ve společnosti Volkswagen Group, je doporučenou horní hranicí tolerovatelných rizikových čísel hodnota 125.



2. FMEA/FMECA

V této kapitole je obsažena rešerše dané problematiky, která je strukturovaná do třech podkapitol.

Kapitola 2.1 seznamuje se základní charakteristikou a postupy analýz. Zdrojem těchto informací je primárně normativní dokument [1], dále pak vojenský standard [2], skriptum [17], monografie [18] a vybrané softwarové nástroje. Důraz je kladen především na semikvantitativně prováděnou analýzu FMECA. Vzhledem k nejednoznačnostem při popisu členění analyzovaného systému ve výše uvedených dokumentech je podrobněji definováno funkční a konstrukční členění a jejich využití v analýzách.

Kapitola 2.2 je zaměřena na kritiku a modifikace současných postupů popsané v odborných člancích. Nedostatky a navržené postupy jsou shrnuty do jednotlivých bodů, ke každému z bodů je pak vždy uvedeno i stanovisko autora této práce.

V poslední části (kapitola 2.3) jsou základními statistickými nástroji zpracována vybraná data semikvantitativních analýz FMECA provedených v průmyslovém prostředí.

2.1 Normy, standardní postupy

Analýzy FMEA a FMECA jsou strukturované spolehlivostní analýzy, sloužící ke zjištění způsobů poruch systémů, jejich příčin, důsledků a v případě FMECA i kritičnosti.

Pozn.: Způsob poruchy resp. mód poruchy je detailnější specifikace samotného poruchového stavu objektu, jedná se vlastně o příčinu poruchového stavu objektu. Příčina způsobu poruchy je pak další stupeň podrobnosti.

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none">• Porucha objektu• Způsob poruchy• Příčina způsobu poruchy | <div style="display: inline-block; vertical-align: middle; text-align: center;"><div style="display: inline-block; vertical-align: middle;">detail</div><div style="display: inline-block; vertical-align: middle;">↓</div></div> <div style="display: inline-block; vertical-align: middle; text-align: center; margin-left: 20px;"><div style="display: inline-block; vertical-align: middle;">↑</div><div style="display: inline-block; vertical-align: middle;">příčinná souvislost</div></div> |
|--|---|

Objekt má zpravidla více způsobů poruch, které mohou nastat z více možných příčin. Některé příčiny mohou být společné více způsobům poruch.

Následek poruchy může být vztažen přímo k poruchovému stavu objektu nebo detailněji ke způsobu poruchy.



Riziko i rizikové číslo⁴ jsou funkcí pravděpodobnosti a následků poruchy, v některých případech i odhalitelnosti poruchy. Metoda FMECA je tedy rozšířením metody FMEA o kvantitativní nebo semikvantitativní hodnocení poruch.

Metoda byla vyvinuta pro armádu Spojených států v roce 1949 jako nástroj pro posuzování poruch systémů a podsystémů. Její další rozvoj a začátek průmyslového využití pak spadá do 60. let 20. století, a to zejména v leteckém a automobilovém průmyslu. V současnosti je FMEA/FMECA jednou z nejpoužívanějších metod analýz spolehlivosti a je využívána nejen v technických oborech. Je popsána například v normě ČSN EN 60812:2006 (01 0675) Techniky analýzy bezporuchovosti systémů – Postup analýzy způsobů a důsledků poruch (FMEA).

Stručná charakteristika metod

U každého prvku analyzovaného systému jsou vybrány potenciálně možné způsoby poruch, ať už jsou příčiny jejich vzniku jakékoliv, a je určena významnost každého poruchového stavu pro funkci systému, případně určité jeho funkce v nižší úrovni členění (obr. 3). Je využíván induktivní postup řešení problému, tedy postup od nejjednodušších prvků analyzovaného systému směrem k nadřazeným úrovním. Díky identifikaci možných způsobů poruch a jejich příčin je pak snazší hledat účinná opatření, jak těmto poruchovým stavům předcházet nebo je zcela eliminovat.

Metody předpokládají využití týmové práce, díky které se objektivizují názory zúčastněných odborníků, a tím eliminují chyby v odhadech. Normou [1] daný postup obsahuje i strukturu vstupních dat (viz Vstupní data, str. 27), která je vhodné v analýze zohlednit. Tím se minimalizují možnosti opomenutí vyšetřit všechny pro daný prvek relevantní informace.

⁴ Pojem riziko budeme chápat jako míru následků vztaženou dle konkrétního případu na časový interval, počet cyklů apod. Používá se v kvalitativním a kvantitativním hodnocení a může mít jednotky např. [Kč/ks], [úmrtí/rok] apod.

Rizikové číslo je bezrozměrným vyjádřením míry rizika v semikvantitativních analýzách.

V některých případech je možné se setkat s pojmem kritičnost, který se vágně objevuje jako alternativa k dvěma výše uvedeným pojmům. Obvykle se používá ve spojení „matice kritičnosti“, která slouží ke stanovení rizika pomocí dvourozměrného pole.

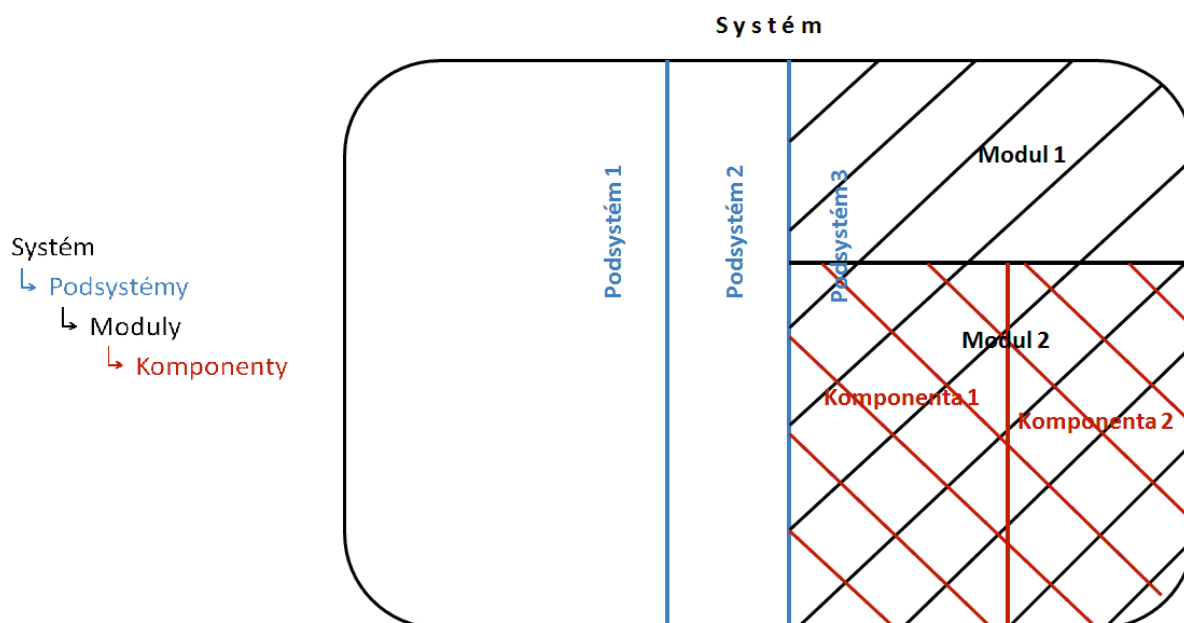
Žádný z výše uvedených pojmů není rozhodně možné používat jako alternativu k pojmům *následek*, *pravděpodobnost* či *intenzita jevu*.



Obě metody jsou široce použitelné v rozmanitých účelových aplikacích. Provádět analýzu je možné v různých obdobích života analyzovaného systému od etapy vývoje (vždy, když vývoj výrobku dospěje do stavu vyžadujícího rozhodnutí o dalším postupu řešení, nebo v případech, kdy je nutno ohodnotit vliv navrhovaných změn), až po etapu provozu. Jedná se o prostředek prokazování dostatečné úrovně bezporuchovosti a bezpečnosti analyzovaného systému ze strany dodavatele zákazníkovi. Celý postup analýzy je možné formalizovat do jednoduchého a srozumitelného pracovního formuláře. Výhodou je relativně malá citlivost na odborné znalosti z oblasti spolehlivosti u pracovníků, kteří se na vypracování analýzy určitým způsobem podílí.

Postup provádění analýzy

Při analýze jsou všechny prvky systému na zvolené nejnižší úrovni podrobeny systematickému zkoumání. Tuto nejnižší úroveň je třeba nejdříve určit dekompozicí systému (neboli tzv. konstrukčním rozpadem systému) viz příklad na obr. 3, kdy zkoumaný systém postupně členíme na menší celky (podsystemy, moduly apod.). Ty jsou pak v poslední fázi rozděleny na nejjednodušší prvky (komponenty). Počet úrovní, na které je systém členěn, je však individuální a záleží na složitosti systému a požadované hloubce analýzy. Důležité je se při konstrukčním členění soustředit na hranice jednotlivých podsystemů, modulů atd., aby byly navzájem disjunktní a zároveň každá komponenta na nejnižší úrovni konstrukčního členění byla jednoznačně přiřazena právě jednomu modulu a jednomu podsystemu na úrovních vyšších. Po konstrukčním členění získáme seznam komponent včetně jejich počtu, které do analyzovaného systému patří.



Obr. 3: Dekompozice systému

V následujícím kroku je nutné pro všechny prvky na zvolené nejnižší úrovni (tedy komponenty) identifikovat dominantní způsoby (módy) poruch, jejich příčiny, následky a v případě kvantitativní analýzy i pravděpodobnost nastoupení těchto poruch a další požadované údaje. Z následků se běžně hodnotí vliv poruchy z hlediska funkčního, ekonomického, bezpečnostního a případně i environmentálního (vliv na životní prostředí).

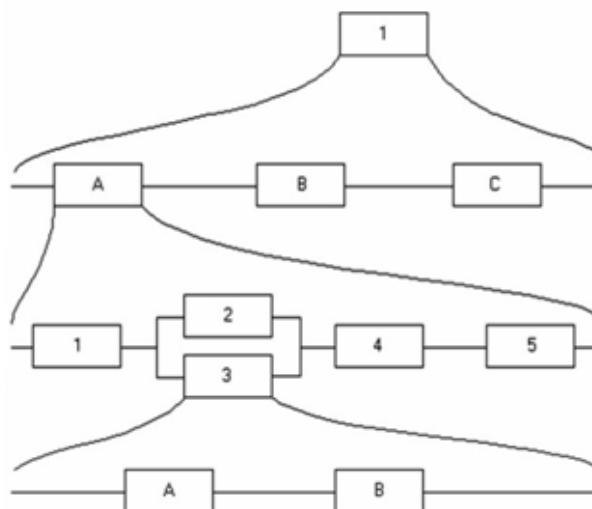
Následky se mohou určovat v několika úrovních systému, a to v úrovních, které odpovídají vytvořenému konstrukčnímu členění. U poruchového stavu komponenty tedy určujeme nejen selhání funkce samotné komponenty, ale i vliv této poruchy na funkce modulů, podsystémů a především pak samotného systému. Pouhé přímé určení vlivu na funkce samotného systému může způsobit opomenutí některých funkčních vazeb. Zjednodušené schéma funkčního členění systému je zobrazeno na obr. 4. U funkčního členění se funkce jednotlivých komponent, nebo o úroveň níže samotné komponenty, mohou vyskytovat vícekrát (na rozdíl od konstrukčního členění), protože porucha jedné komponenty může ovlivňovat více funkcí na úrovních vyšších.

Funkce na úrovni systému

Funkce na úrovni podsystémů

Funkce na úrovni modulů

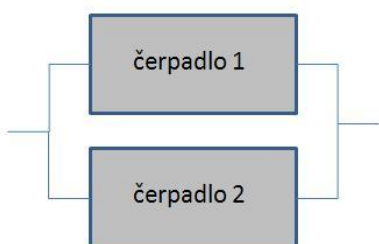
Funkce na úrovni komponent



Obr. 4: Funkční členění systému

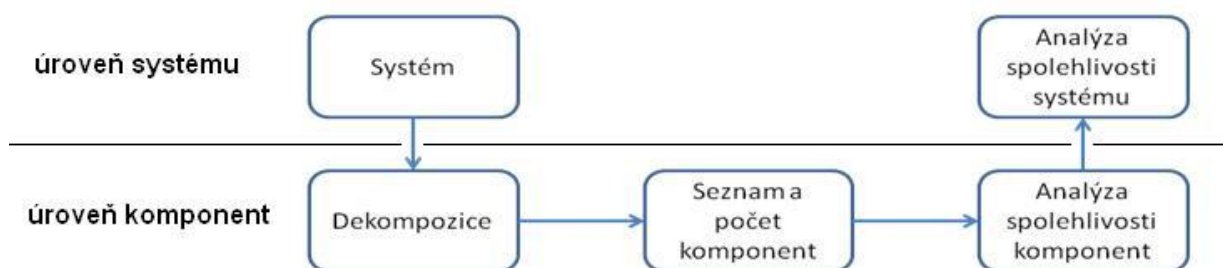
Důležité je tedy nezaměňovat dekompozici systému se strukturou funkčních vazeb mezi bloky v jednotlivých úrovních. Přestože u mnoha systémů mohou struktury korespondovat, nelze se na toto spoléhat.

Pozn.: Příklad rozdílu funkčního a konstrukčního členění systému dvou čerpadel přečerpávajících médium mezi dvěma nádržemi. Maximální kapacita každého z čerpadel je $50 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$; požadovaný průtok je $80 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$.

Konstrukční členění:

Funkční členění:


Obr. 5: Příklad konstrukčního a funkčního členění systému

Základní schéma postupu analýzy systému pro dvouúrovňové konstrukční členění je znázorněno na obr. 6.



Obr. 6: Základní postup analýzy systému

2.1.1 Kvalitativní analýza

Kvalitativně prováděná analýza (zde se vždy jedná o metodu FMEA; metoda FMECA je její nadstavbou právě o kvantitativní hodnocení) je strukturovaná analýza, ve které se pro hodnocení závažnosti a pravděpodobnosti poruchy používá pouze slovní hodnocení. Na základě tohoto slovního hodnocení se případně navrhnou nápravná opatření. Tento postup se v dnešní době aplikuje spíše výjimečně, převládá semikvantitativní a plně kvantitativní přístup.

2.1.2 Kvantitativní analýza

Kvantitativní analýza se zakládá na plně kvantitativním vyčíslení výsledného rizika plynoucího ze zjištěných módů poruch u každé komponenty. Obecně je výsledné riziko počítáno jako součin pravděpodobnosti a následků. Alternativně lze pro výpočet průměrného rizika pravděpodobnost poruchy nahradit ukazatelem intenzity poruchy v jednotkách $[h^{-1}]$. Konkrétní následky, ať přímo související s analyzovaným zařízením, nebo sekundární, plynoucí z následků na výrobní proces, bezpečnost práce, životní prostředí či jiné uvažované faktory, se obvykle vyjadřují finanční hodnotou⁵ [Kč]. Tento typ analýzy poskytuje číselné výstupy v příslušných jednotkách, tedy například $[Kč \cdot h^{-1}]$, je však časově náročný a klade

⁵ Existují studie finančního ocenění následků na životní prostředí či lidské zdraví, např.:

Serup-Hansen N., Gudum A., Soerensen M.M., Valuation of Chemical Related Health Impacts. Environmental Project NR. 929 2004

Pearce D., Valuing Risk to Life and Health, Towards Consistent Transfer Estimates in the European Union and Accession States, 2000

Volfová J., Selected Economic Approaches in Valuation of Human Health, 2007



výrazné požadavky na vstupní data.

Jak již bylo zmíněno, stávající model popsany v normách [1] a [2] zohledňuje dva nebo tři hodnocené faktory. V prvním případě, kdy je hodnocena pravděpodobnost a následky, je riziko dáno vztahem (1). V druhém případě, kdy je hodnoceno riziko plynoucího z dodání vadného výrobku zákazníkovi a je tedy navíc hodnocen faktor odhalitelnosti, je riziko dáno vztahem (2).

- $$R_k = P_k \cdot N_k \quad (1)$$

R_k kvantitativně vyjádřené riziko plynoucí z analyzovaného poruchového stavu [Kč],

P_k kvantitativně vyjádřená pravděpodobnost nastoupení poruchy,

N_k kvantitativně vyjádřené následky způsobené poruchou [Kč].

- $$R_k = P_k \cdot (1 - O_k) \cdot N_k \quad (2)$$

O_k odhalitelnost poruchového stavu před dodáním výrobku zákazníkovi⁶,

příčemž jeho hodnota je v intervalu $< 0; 1 >$.

Zatímco P_k vyjadřuje pravděpodobnost nastoupení poruchového stavu, součin $P_k \cdot (1 - O_k)$ vyjadřuje pravděpodobnost toho, že bude zákazníkovi předán vadný výrobek (poruchový stav nebude detekován během výrobního či kontrolního procesu).

⁶ Odhalitelnost vyjadřuje pravděpodobnost odhalení poruchového stavu během výrobního či kontrolního procesu za předpokladu, že tento poruchový stav nastal. Jedná se tedy o podmíněnou pravděpodobnost.



2.1.3 Semikvantitativní analýza

Semikvantitativní hodnocení je specifické právě pro metodu FMECA. Pro analýzy využívající blokové či stromové struktury (např. analýzy RBD, FTA, ETA) nejsou postupy využívající semikvantitativní hodnocení popsány, lze je tedy v současné době provádět pouze na kvalitativní a plně kvantitativní úrovni.

Hodnoceným faktorům, které jsou totožné s hodnocenými faktory kvantitativní analýzy (pravděpodobnost, odhalitelnost, následky), jsou u každého nalezeného poruchového stavu komponent přiřazena bodová ohodnocení pomocí předem definovaných hodnotících stupnic. Z bodových ohodnocení je následně ke každému poruchovému stavu komponent spočteno rizikové číslo *RPN* (Risk Priority Number). Rizikové číslo *RPN* definuje nerostoucí uspořádání hodnocených způsobů poruch.

Hodnotící stupnice

Norma ČSN EN 60812:2006 předkládá hodnotící stupnice pro všechny 3 hodnocené faktory. Stupnice jsou uvedeny v následujících tabulkách. Alternativy k těmto používaným stupnicím jsou například součástí softwaru Reliasoft XFMEA a jsou uvedeny v příloze 1.

Tab. 2: Stupnice pro hodnocení pravděpodobnosti

Kvalitativní popis	Klasifikace	Četnost	Pravděpodobnost
Velice slabá: Porucha je nepravděpodobná	1	$\leq 0,010$ na tisíc vozidel/objektů	$\leq 1,0E-05$
Nízká: Poměrně málo poruch	2	0,1 na tisíc vozidel/objektů	1,0E-04
	3	0,5 na tisíc vozidel/objektů	5,0E-04
Střední: Občasné poruchy	4	1 na tisíc vozidel/objektů	1,0E-03
	5	2 na tisíc vozidel/objektů	2,0E-03
	6	5 na tisíc vozidel/objektů	5,0E-03
Vysoká: Opakující se poruchy	7	10 na tisíc vozidel/objektů	1,0E-02
	8	20 na tisíc vozidel/objektů	2,0E-02
Velmi vysoká: Porucha je téměř nevyhnutelná	9	50 na tisíc vozidel/objektů	5,0E-02
	10	≥ 100 na tisíc vozidel/objektů	$\geq 1,0E-01$



Tab. 3: Stupnice pro hodnocení odhalitelnosti

Odhalitelnost	Kritéria: Pravděpodobnost detekce při řízení návrhu	Klasifikace
Téměř jistá	Při řízení návrhu se bude téměř jistě detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	1
Velmi vysoká	Je velmi vysoká šance, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	2
Vysoká	Je vysoká šance, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	3
Středně vysoká	Je středně vysoká šance, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	4
Střední	Je střední šance, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	5
Nízká	Je malá šance, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	6
Velmi nízká	Je velmi malá šance, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	7
Slabá	Je slabá šance, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	8
Velice slabá	Je velice slabá šance, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	9
Absolutně nejistá	Při řízení návrhu se nebude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy nebo žádné řízení návrhu neexistuje	10

Tab. 4: Stupnice pro hodnocení následků

Následky	Kritéria	Klasifikace
Žádné	Žádný zjiřitelný důsledek.	1
Velmi málo významné	Skřípající a chřastící objekt není ve shodě s požadavky na správné uložení a opracování. Vadu zpozorují nároční zákazníci (méně než 25 %).	2
Málo významné	Skřípající a chřastící objekt není ve shodě s požadavky na správné uložení a opracování. Vadu zpozoruje 50 % zákazníků.	3
Velmi nízké	Skřípající a chřastící objekt není ve shodě s požadavky na správné uložení a opracování. Vadu zpozoruje většina zákazníků (více než 75 %).	4
Nízké	Vozidlo je provozuschopné/objekt je provozuschopný, ale objekt (objekty) zajišťující pohodlí je provozuschopný (jsou provozuschopné) se sníženými technickými parametry. Zákazník je poněkud nespokojen.	5
Střední	Vozidlo je provozuschopné/objekt je provozuschopný, ale objekt (objekty) zajišťující pohodlí není provozuschopný (nejsou provozuschopné). Zákazník je nespokojen.	6
Vysoké	Vozidlo je provozuschopné/objekt je provozuschopný, ale se sníženou úrovní technických parametrů. Zákazník je velmi nespokojen.	7
Velmi vysoké	Vozidlo není provozuschopné/objekt není provozuschopný (ztráta základní funkce).	8
Nebezpečné s varováním	Velmi vysoká klasifikace závažnosti, když potenciální způsob poruchy, který na sebe upozorňuje varováním, ovlivňuje bezpečný provoz vozidla a/nebo znamená nesoulad s vládními předpisy.	9
Nebezpečné bez varování	Velmi vysoká klasifikace závažnosti, když potenciální způsob poruchy, který na sebe neupozorňuje varováním, ovlivňuje bezpečný provoz vozidla a/nebo znamená nesoulad s vládními předpisy.	10



Rizikové číslo *RPN* – semikvantitativní přístup

Rizikové číslo *RPN* je rozhodujícím kritériem pro identifikaci slabých míst systému, na která je vhodné aplikovat nápravná opatření snižující riziko plynoucí z poruchy zařízení. Velikost rizikového čísla je dána součinem bodových ohodnocení pravděpodobnosti, odhalitelnosti a následků⁷.

$$RPN = P \cdot O \cdot N \quad (3)$$

P semikvantitativně vyjádřená pravděpodobnost poruchy,

O semikvantitativně vyjádřená odhalitelnost poruchového stavu,

N semikvantitativně vyjádřené následky poruchy.

Rozsah hodnot *RPN* je závislý na volbě hodnotících stupnic, pro stupnice uvedené v tab. 2-4 je minimální hodnota 1 a maximální hodnota 1000, přičemž *RPN* může nabývat jenom některých hodnot z uvedeného rozsahu⁸.

⁷ Protože je *RPN* dáno součinem bodových ohodnocení, jedná se o bezrozměrnou veličinu.

⁸ *RPN* může nabývat v rozsahu 1 až 1000 pouze 120 hodnot. Jsou to ty hodnoty, které lze rozložit na součin 3 celočíselných činitelů v rozsahu 1 až 10, přičemž není podmínkou, aby byly činitele různé.

RPN může nabývat těchto hodnot:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	15	16	18	20	21	24
25	27	28	30	32	35	36	40	42	45	48	49	50	54	56	60	63	64
70	72	75	80	81	84	90	96	98	100	105	108	112	120	125	126	128	135
140	144	147	150	160	162	168	175	180	189	192	196	200	210	216	224	225	240
243	245	250	252	256	270	280	288	294	300	315	320	324	336	343	350	360	378
384	392	400	405	420	432	441	448	450	480	486	490	500	504	512	540	560	567
576	600	630	640	648	700	720	729	800	810	900	1000						

To, že některá *RPN* mohou být společná pro více kombinací činitelů, není pro hodnocení omezující.

Matice kritičnosti/rizika

V některých aplikacích, ve kterých není hodnocena odhalitelnost, ale pouze pravděpodobnost poruchy a její následky, je možné použít tzv. matici kritičnosti (někdy označovanou jako matici rizika). Na rozdíl od výpočtu konkrétní hodnoty, jak tomu je u hodnocení pomocí *RPN*, je zde rozhodující umístění události v matici. Matice kritičnosti z normy ČSN EN 60812:2006 je zobrazena na obr. 7.

Pravděpodobnost výskytu	5 (A)				Vysoké riziko
	4 (B)		Způsob poruchy 1		
	3 (C)				
	2 (D)			Způsob poruchy 2	
	1 (E)	Nízké riziko			
		I	II	III	IV
		Závažnost			

Obr. 7: Matice kritičnosti

Pro zařazení poruchového stavu do příslušné buňky matice je nutné definovat kategorie stupnic pro hodnocení následků (na obr. 7 označeno jako „Závažnost“) a pravděpodobnosti výskytu. Tyto stupnice se mohou vzhledem k aplikačnímu odvětví značně lišit a jsou ve většině případů definovány analytikem. Jako příklad pro hodnocení pravděpodobnosti je v normě uvedena následující hodnotící stupnice.

Pravděpodobnost výskytu události:

- 1: nepravděpodobný výskyt, pravděpodobnost výskytu: $0 \leq P_i < 0,001$
- 2: velmi slabý výskyt, pravděpodobnost výskytu: $0,001 \leq P_i < 0,01$
- 3: občasný výskyt, pravděpodobnost výskytu: $0,01 \leq P_i < 0,1$
- 4: pravděpodobný výskyt, pravděpodobnost výskytu: $0,1 \leq P_i < 0,2$
- 5: častý výskyt, pravděpodobnost výskytu: $0,2 \leq P_i \leq 1$

Z obr. 7 je patrné, že riziko se z levého dolního rohu matice směrem doprava a nahoru zvyšuje. Konkrétní specifikace rizika v každé buňce matice je znázorněna na obr. 8.



Četnost výskytu důsledku poruchy	Úrovně závažnosti			
	1 Nevýznamná	2 Nízká	3 Kritická	4 Katastrofická
5: Častý výskyt	Nežádoucí	Nepřípustné	Nepřípustné	Nepřípustné
4: Pravděpodobný výskyt	Přípustné	Nežádoucí	Nepřípustné	Nepřípustné
3: Občasný výskyt	Přípustné	Nežádoucí	Nežádoucí	Nepřípustné
2: Velmi slabý výskyt	Zanedbatelné	Přípustné	Nežádoucí	Nežádoucí
1: Nepravděpodobný výskyt	Zanedbatelné	Zanedbatelné	Přípustné	Přípustné

Obr. 8: Matice kritičnosti

Užití metody FMECA

Metoda FMECA má následující základní způsoby užití:

V období vznikajícího návrhu a konstrukce systému:

- Analyzují se všechny možné poruchové stavy komponent systému, které na základě inženýrských zkušeností mohou při uvažovaném konstrukčním řešení nastat. V následné analýze se zjišťují závažnosti jejich následků a hledají se možné příčiny, které náleží do samotné konstrukce systému, s cílem je odstranit či potlačit změnou konstrukčního řešení - tzv. FMECA konstrukční.

Při návrhu výrobního nebo montážního procesu:

- Zjišťují se možné poruchové stavy komponent systému, které mohou vzniknout při samotném výrobním nebo montážním procesu a na výstupu zapříčinit vadný systém. Cílem může být volba vhodné výrobní technologie, zajištění potřebných podmínek výroby či montáže nebo i zpětná vazba pro konstrukční změnu v návrhu. Jedná se o FMECA procesní, měla by navazovat na FMECA konstrukční a provádí se při závěrečné fázi schvalování technické přípravy výroby.

Při hledání souvislosti výstupů FMECA konstrukční a procesní:

- Výsledkem je komplexnější pojetí systému, které je označováno jako tzv. FMECA systémová.

Pozn.: U analýz jednoduchých systémů se často přistupuje přímo k provedení systémové analýzy FMECA s přihlédnutím ke všem možným typům příčin poruchových způsobů a dílčí metody FMECA konstrukční a procesní se neprovádějí.



Dále je možné metodu použít výše uvedenými způsoby při modifikacích a modernizacích systému nebo při změnách provozních podmínek.

Vstupní data

K samotné analýze systému metodou FMECA je nezbytné, aby byly vymezeny podmínky jejího provedení a analytik měl k dispozici všechny potřebné vstupní údaje. Jedná se především o následující informace:

- účel a cíle analýzy, např.:
 - prokázání požadavků na spolehlivost,
 - specifikace kritických prvků systému,
 - poskytnutí vstupní informace pro návrh údržby a technické diagnostiky,
- technický popis systému,
- definice funkcí systému,
- dekompozice systému,
- definice rozhraní systému,
- údaje o prvcích systému,
 - jednoznačná identifikace prvků na schématech, výkresech apod.,
 - popis funkcí prvků,
 - popis možných způsobů poruch prvků,
 - popis důsledků poruch prvků, případně jejich kvantifikace,
 - pravděpodobnost jednotlivých způsobů poruch prvků (pokud se provádí kvantitativní analýza) a zdroj údajů o pravděpodobnosti.

Pozn.: Zjištění některých výše uvedených bodů může být součástí až samotné analýzy.

2.1.4 Softwarové nástroje

Pro provedení jednoduché analýzy FMEA/FMECA je možné využít běžně dostupných tabulkových procesorů (např. MS Excel). V průmyslovém prostředí, kde jsou prováděné analýzy rozsáhlé a kde je nutné zpracovávat velké množství vstupních dat, je výhodné použití profesionálního softwaru.

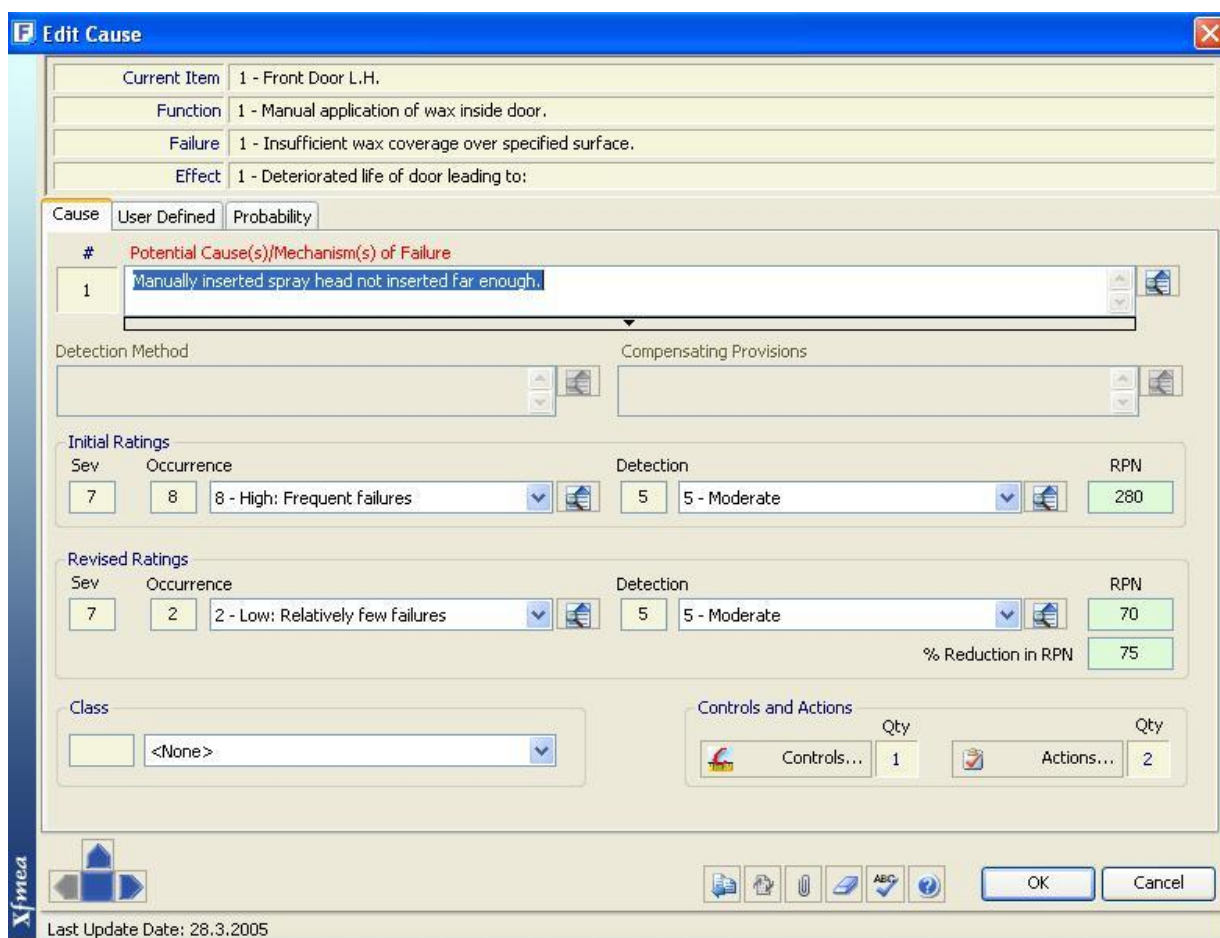


- **ITEM Toolkit FMECA:** FMECA založená na postupech americké vojenské normy MIL-STD-1629A, dále BS 5760 Part 5 (British Standard), ISO 9000, ISO 14 971 a IEC 61 508. <http://www.itemsoft.com>

Part Name / Part Function	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	S E V	Delta	Potential Cause(s) of Failure	O C C	Design Verification	D E T	R. P. N.
2-P system /	Pamet 3 neplni spravne funkci		2	☐	Porucha pameti	1		7	14
	Sbernice neplni spravne funkci		10	☐	Porucha sbernice	3		1	30
	Vypocetni cast 1 neplni spravne funkci		5	☐	Diskove pole 1 neplni spravne funkci	8		3	120
					Procesor 1 neplni spravne funkci	2		3	6
					Pamet 1 neplni spravne funkci	1		7	7
	Vypocetni cast 2 neplni spravne funkci		5	☐	Procesor 2 neplni spravne funkci	2		3	30
					Pamet 2 neplni spravne funkci	1		7	7
					Diskove pole 2 neplni spravne funkci	8		2	16

Obr. 9: ITEM Toolkit FMECA - Ohodnocení události a výpočet rizikového čísla RPN

- **Rellex FMEA/FMECA:** Analýzy podle různých standardizovaných i uživatelsky definovaných postupů. Obsahuje rozsáhlou databázi informací o způsobech poruch elektronických i mechanických prvků (EPRD-95 a FMD-97) a je v souladu se standardy MIL-STD-1629A, SAE ARP 5580, SAE J1739, IEC 60 812 a BS 5760. <http://www.rellexsoftware.com/>
- **Reliasoft Xfmea:** Software pro provádění FMECA/FMEA. Umožňuje provedení analýzy v souladu s řadou standardizovaných postupů i uživatelsky definovaným způsobem (J 1739, ARP 5580, MIL-STD-1629A, aj.). <http://www.reliasoft.com/>



Edit Cause

Current Item: 1 - Front Door L.H.
Function: 1 - Manual application of wax inside door.
Failure: 1 - Insufficient wax coverage over specified surface.
Effect: 1 - Deteriorated life of door leading to:

Cause: User Defined Probability

Potential Cause(s)/Mechanism(s) of Failure
1 Manually inserted spray head not inserted far enough.

Detection Method:
Compensating Provisions:

Initial Ratings
Sev: 7 Occurrence: 8 8 - High: Frequent failures Detection: 5 5 - Moderate RPN: 280

Revised Ratings
Sev: 7 Occurrence: 2 2 - Low: Relatively few failures Detection: 5 5 - Moderate RPN: 70
% Reduction in RPN: 75

Class: <None>

Controls and Actions
Controls... Qty: 1 Actions... Qty: 2

Last Update Date: 28.3.2005

Obr. 10: Reliasoft FMEA - Ohodnocení události a výpočet rizikového čísla RPN

- **RRM:** Software pro zjednodušenou analýzu RCM. Přestože se zde nejedná přímo o analýzu FMECA (FMECA samotné analýze RCM většinou předchází a slouží jako její vstup), je z obr. 11 dobře patrný princip hodnocení nežádoucích událostí pomocí matice kritičnosti.

		S-RCM ETBF	RRM Criticality Class				
Probability	H	0.0 - 0.5 y	L	MH	H	E	E
	M	0.5 - 4.0 y	L	M	MH	H	E
	L	4.0 - 20.0 y	N	L	M	MH	H
	N	> 20.0 y	N	N	L	M	MH
Economic			Slight Damage < 10k	Minor Damage 10 - 100k	Local Damage 100 - 1000k	Major Damage 1 - 10M	Extensive Damage > 10M
Health & Safety			Slight Injury	Minor Injury	Major Injury	Single Fatality	Multiple Fatality
Environment			Slight Effect	Minor Effect	Localised Effect	Major Effect	Massive Effect
Consequence classes			N	L	M	H	E

Obr. 11: Matice kritičnosti softwaru RRM

Výčet dostupných softwarů není kompletní, první tři z výše uvedených jsou však na trhu dominantní. Postupy provádění analýzy v uvedených softwarech korespondují s postupy uvedenými v normách, tedy i s výpočtem rizikového čísla *RPN* a způsobem používání matice kritičnosti/rizika.

2.1.5 Formulář a schéma postupu analýzy

Jak již bylo zmíněno, analýzu FMEA/FMECA lze provést i bez specializovaného softwaru na jednoduchém tabulkovém formuláři. Způsob identifikace analyzované komponenty se může v různých aplikacích lišit, důležitá je pouze její jednoznačnost, aby nebylo možné mezi sebou komponenty zaměnit. Vhodné je například použít označení komponent ve výkresové dokumentaci, na rozdíl od výrobních čísel, která mohou být společná pro konstrukčně identické komponenty plnící však v systému rozdílnou funkci. Formuláře se dále liší na základě toho, zda je analýza aplikována na úrovni kvalitativní, semikvantitativní nebo kvantitativní. Pro tyto 3 způsoby provedení jsou níže uvedeny názvy standardních polí hlaviček formulářů.



Kvalitativní analýzy FMEA:

- Identifikace komponenty
- Název komponenty
- Funkce
- Způsob poruchy
- Příčina poruchy
- Způsob detekce
- Popis následků

Semikvantitativní FMECA (použití bodových stupnic):

- Všechna pole analýzy FMEA
- Pravděpodobnost (bodově)
- Odhalitelnost (bodově)
- Následky (bodově)
- Rizikové číslo *RPN*

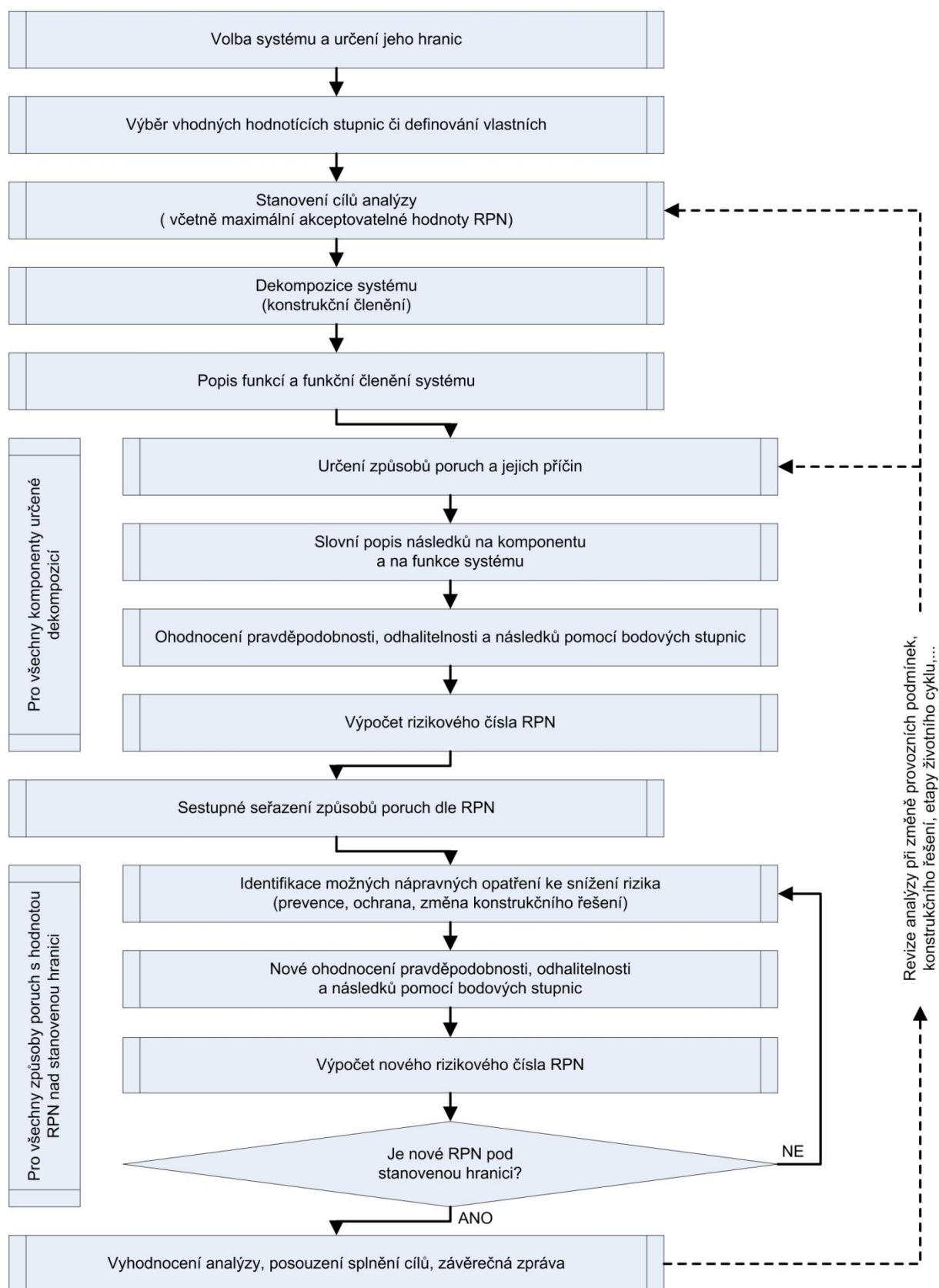
Semikvantitativní FMECA (použití matice kritičnosti/rizika):

- Všechna pole analýzy FMEA
- Pravděpodobnost (bodově nebo slovním popisem)
- Následky (bodově nebo slovním popisem)
- Riziko (bodově nebo slovním popisem)

Kvantitativní FMECA:

- Všechna pole analýzy FMEA
- Pravděpodobnost
- Následky
- Riziko

Struktura formuláře analýzy se pro různé typy analyzovaných systémů může v některých detailech lišit. Samotný postup semikvantitativně prováděné analýzy FMECA pomocí rizikového čísla *RPN* je schematicky znázorněn na obr. 12.



Obr. 12: Schéma postupu semikvantitativní analýzy FMECA



2.2 Rešerše odborných publikací

Články z odborných časopisů a konferenční příspěvky jsou odezvou na postupy dané normou. Zaměřují se jak na analýzu stávajícího postupu, tak na vývoj postupů nových. Určení nevýhod používaných postupů a navržení postupů alternativních je shrnuto například v člancích [8], [14], a to následujícím způsobem.

Kritické zhodnocení semikvantitativní analýzy FMECA:

1. *RPN* nesplňuje obvyklé požadavky měření.
2. Neexistuje rozumný důvod ke kombinaci nelineární stupnice pravděpodobnosti a lineární stupnice odhalitelnosti.
3. Různá pravděpodobnost vadného výrobku u zákazníka při stejných *RPN*.
4. Neexistuje rozumný důvod pro volbu součinu ve výpočtu *RPN*.
5. *RPN* nezohledňuje počet komponent a počítá riziko pocházející z jedné položky.
6. Nelze racionálně vyhodnotit účinnost nápravných opatření.
7. Pravděpodobnost a odhalitelnost poruchy nemusejí být nezávislé.

Stanovisko autora k výše uvedeným bodům:

Ad 1: Obvyklé požadavky měření nejsou v publikaci detailněji specifikovány, lze se tedy pouze domnívat, že se jedná o absenci měrných jednotek. Dále chybí možnost události podle *RPN* jednoznačně porovnávat, což souvisí s nedostatky uvedenými v dalších bodech (především 2. a 4.).

Primárním účelem *RPN* je seřazení hodnocených událostí od nejvíce rizikových po nejméně rizikové, které však díky současně doporučeným postupům není možné. Předpoklady nutné pro korektní výpočet *RPN* jsou detailně popsány v kapitole 3.4. Absence jednotek není pro účel řazení důležitá.

Ad 2: Podrobná analýza používaných hodnotících stupnic je součástí kapitoly 3.2, zhodnocení výpočtu při doporučených stupnicích v kapitole 3.3. Nejenže neexistuje rozumný důvod pro použití součinu bodových ohodnocení pravděpodobnosti a odhalitelnosti, ale na základě stejného principu i bodového hodnocení následků.



Ad 3: Číslo *RPN*, jak již vychází z jeho názvu, slouží k hodnocení rizika. Riziko je obecně dáno součinem pravděpodobnosti a následků, z toho je tedy zřejmé, že stejná hodnota rizika může být dána více variantami vstupních hodnot. Pokud bychom chtěli porovnávat události pouze podle pravděpodobnosti vadného produktu u zákazníka, nepotřebujeme k tomu hodnocení pomocí *RPN*, ale pouze hodnocení pravděpodobnosti nežádoucí události a její odhalitelnosti.

Ad 4: Použití součinu ve výpočtu *RPN* při stávajících hodnotících stupnicích opravdu není opodstatněné. Popis a kvantifikace této chyby je součástí práce společně s návrhem nového řešení.

Ad 5: V případě, že systém obsahuje komponenty, které jsou konstrukčně i funkčně totožné, je možné tyto komponenty analyzovat hromadně s přihlédnutím k jejich počtu v systému. Jednou z variant je zohlednění tohoto počtu při hodnocení pravděpodobnosti poruchy.

Ad 6: Na základě snížení *RPN* není možné kvantifikovat snížení rizika. Rozhodujícím kritériem nemůže být absolutní hodnota rozdílu dvou *RPN* ani jejich poměr. V případě možnosti aplikace více nápravných opatření lze pouze vybrat opatření, které snižuje *RPN* nejvíce.

Ad 7: Obecně mohou být pravděpodobnost poruchy a odhalitelnost poruchy závislé. Odhalitelnost poruchy pak primárně závisí na pravděpodobnosti poruchy tím způsobem, že s rostoucí pravděpodobností poruchy roste i míra její odhalitelnosti.

Modifikace metody FMECA navržené v odborné literatuře⁹:

- A. Nahrazení následků součinem finančních následků na jednotku chybného výrobku a počtu těchto výrobků. [8]
- B. Vybrané faktory lze zvýraznit/potlačit změnou bodového rozsahu stupnic. [8]
- C. Nahrazení bodového ohodnocení pravděpodobnosti nastoupení poruchy za výraz 2^x , kde x je bodové ohodnocení. [8]

⁹ Řazení navržených modifikací nekoresponduje s výše uvedenými body kritického zhodnocení metody.



- D. Pomocí teorie sítí hledat nejzávažnější příčiny, nikoliv nejzávažnější způsoby poruch (jedna příčina může způsobit více poruch). [14]
- E. Zaměřit se na hodnocení poskytnutá zákazníky. Upravení faktoru následků pomocí KANO modelů. [7]
- F. Řešení vztahu mezi nápravnými opatřeními – nemusí být nezávislé. Hledání posloupnosti nápravných opatření tak, aby to bylo nákladově a časově efektivní. Prioritu lze dát pravděpodobnosti – četnost nejvíce ovlivní zákazníka. [15]
- G. Přejít na stanovení *RPN* fuzzy způsobem. [16]

Stanovisko autora k výše uvedeným bodům:

Ad A: Počet komponent je vhodnější do modelu zakomponovat při hodnocení pravděpodobnosti poruchy. Přestože výsledné riziko je totožné, při větším počtu kusů roste pravděpodobnost poruchy, nikoliv jejich následky.

Ad B: Při hodnocení rizika, které je jasně dáno součinem pravděpodobnosti poruchy a jejích následků, není důvod preferovat jeden ze vstupních parametrů. Pro zohlednění pravděpodobnosti poruchy existují metody jako např. metoda počítání z dílů, deterministické metody naopak zohledňují pouze následky.

Ad C: Jedná se o převedení semikvantitativního postupu na kvantitativní. Při tomto převodu by se měly obdobným způsobem transformovat i stupnice pravděpodobnosti a odhalitelnosti.

Ad D: Tento přístup umožňuje efektivní vynaložení finančních zdrojů určených na nápravná opatření. Vstupními daty jsou bohužel nesprávně vypočtená *RPN*, avšak uvedený postup lze aplikovat i na modifikovaný výpočet *RPN* z této práce.

Ad E: Metoda FMECA zohledňuje hodnocení zákazníky již ve stávající podobě uvedené v normách.

Ad F: Řešení vztahu mezi nápravnými opatřeními je alternativou k bodu 0. Zvýšení důležitosti faktoru pravděpodobnosti je v rozporu s hodnocením rizika – viz Ad B.

Ad G: Fuzzy přístup může dávat jiné pořadí hodnocených způsobů poruch než je pořadí dle standardního výpočtu *RPN*. Problémem může být individuální nastavení funkcí příslušnosti a tím vnesení značné subjektivity do výpočtového modelu.

2.3 Analýzy FMECA v průmyslovém prostředí

V této kapitole jsou základními statistickými nástroji zpracována data analýz, která byla poskytnuta firmou z automobilového průmyslu.

Z provedených analýz FMECA byla k vyhodnocení poskytnuta pouze bodová ohodnocení bez specifikace zařízení a jejich způsobů poruch a příčin, to však nemá vliv na kvalitu a vypovídací hodnotu níže uvedených statistik.

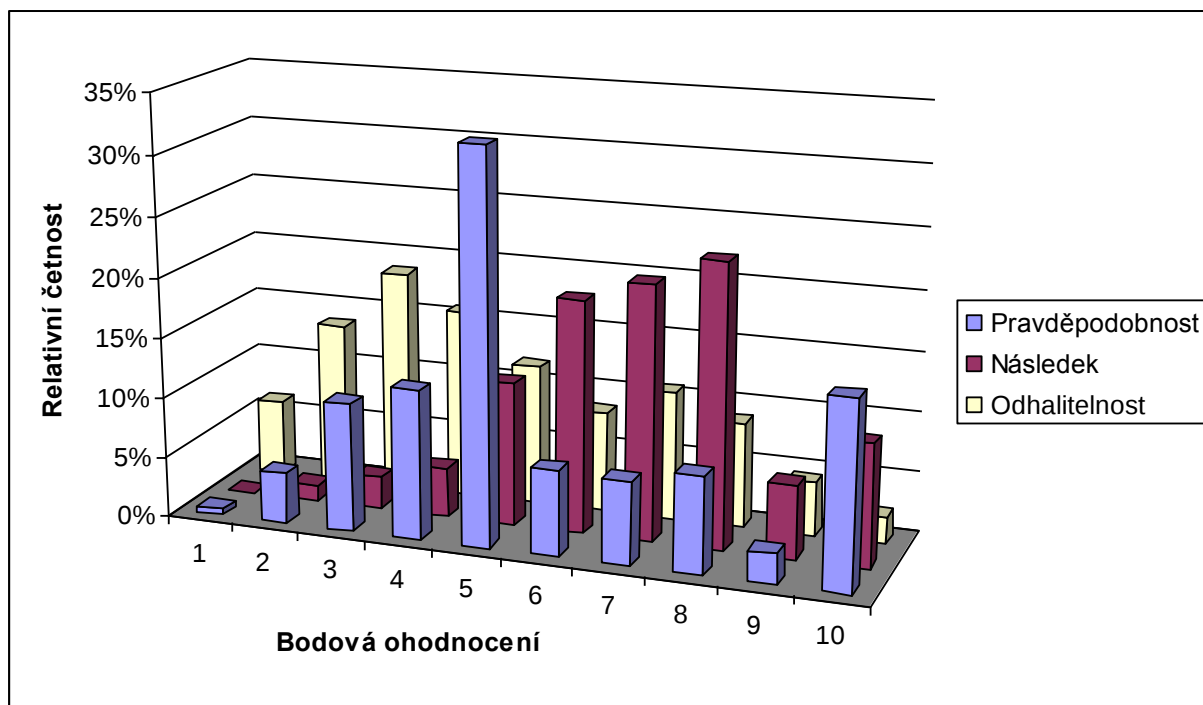
Rozsah statistického souboru: $n = 1423$

Statistické znaky: pravděpodobnost, odhalitelnost a následky poruchy

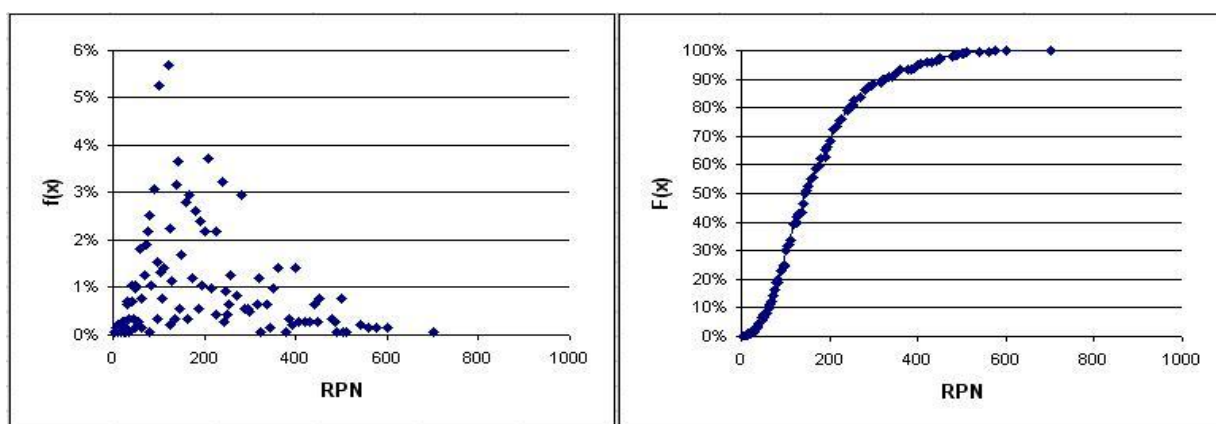
Rozsah statistických znaků: bodová ohodnocení od 1 do 10 (celá čísla)

Tab. 5: Základní statistické údaje

	Pravděpodobnost	Následek	Odhalitelnost
Průměr	5,8	6,9	4,7
Modus	5	8	3
Medián	5	7	4



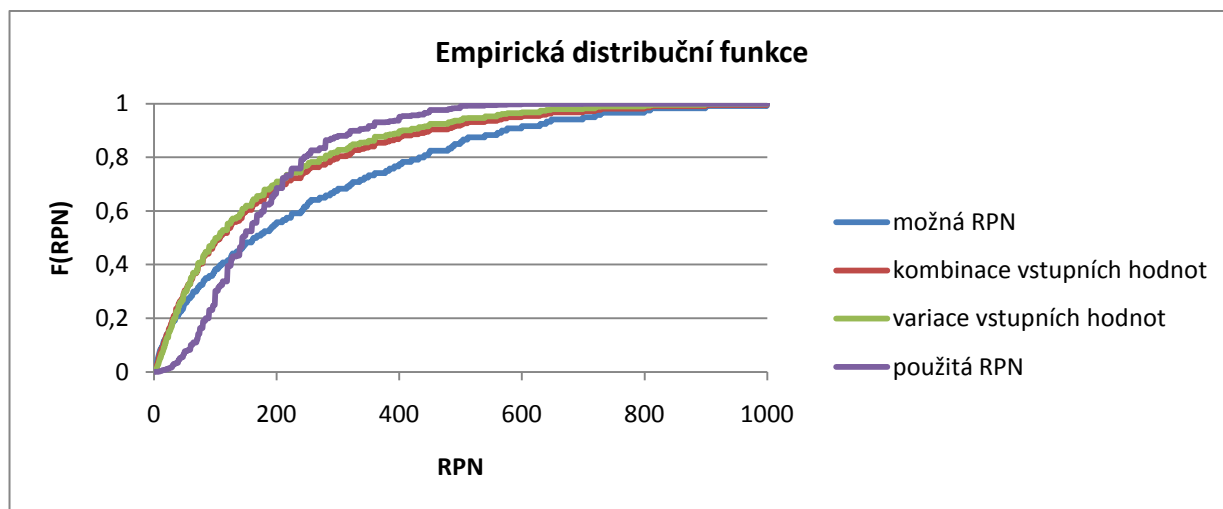
Obr. 13: Relativní četnosti bodových ohodnocení



Obr. 14: Hustota pravděpodobnosti a empirická distribuční funkce RPN

Dle grafů uvedených na obr. 14 není četnost jednotlivých RPN v jeho rozsahu rovnoměrná¹⁰. Například pro RPN na množině $\{100, \dots, 200\}$, která tvoří 10% rozsahu a necelých 20% z celkového počtu možných RPN , se vyskytuje cca 40% hodnocených událostí.

Z následujícího grafu je patrný především různý průběh empirických distribučních funkcí použitých a možných RPN . Na grafu jsou dále zobrazeny empirické distribuční funkce počtu kombinací a variací vstupních parametrů, ze kterých jsou dopočítávány jednotlivá RPN .



Obr. 15: Empirická distribuční funkce

Vzhledem k nastavení hodnotících stupnic a zkušenostem autora lze usuzovat, že rozdělení četnosti RPN v jeho rozsahu není rovnoměrné ani při jiných aplikacích.

¹⁰ Hypotéza o rovnoměrném rozdělení je zamítnuta na hladině významnosti 99% testem χ^2 .



3. Modifikace FMECA - řešení

Na základě provedené rešerše, především kritického zhodnocení nedostatků FMECA v kapitole 2.2, jsou navrženy změny, které vedou k rozšíření aplikovatelnosti díky možnosti volit hodnocené faktory (kap. 3.1) a strukturu hodnotících stupnic (kap. 3.2). Dále je analyzován a modifikován postup výpočtu rizikového čísla tak, aby pořadí hodnocených způsobů poruch nebo obecněji nežádoucích událostí lépe korespondovalo s pořadím dle skutečného rizika (kap. 3.3 až 3.6).

3.1 Hodnocené faktory

Ve stávajících postupech se nepředpokládá hodnocení více než třech uvedených faktorů. Obecně lze takových faktorů určit libovolné množství, vždy by ale mělo být možné jejich rozdělení do dvou základních skupin: pravděpodobnost a následky. Hodnocené kritérium odhalitelnosti ve své podstatě pouze redukuje pravděpodobnost nastoupení následků v případě hodnocení rizika dodání vadného výrobku cílovému zákazníkovi.

Mezi další obecně vhodné hodnocené faktory by bylo možné zařadit například následující:

- zjevnost/skrytost poruchy,
- následky na životní prostředí,
- následky na bezpečnost.

Nutnou podmínkou korektního použití navržených faktorů je to, aby byly navzájem disjunktní, nezávislost není podmínkou. Pokud budou tedy zvlášť hodnoceny následky na bezpečnost, je nutné vyjmout ze standardní stupnice následků právě ta ohodnocení, která se bezpečnosti týkají.

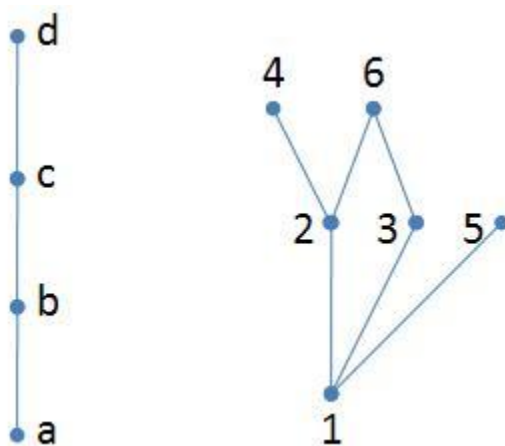
3.2 Hodnotící stupnice

Pro určení výsledného pořadí hodnocených událostí podle rizikového čísla je nutné, aby bodová ohodnocení tvořila ve stupnicích uspořádání. Uspořádáním se rozumí libovolná relace

R , která je reflexivní, antisymetrická a tranzitivní¹¹.

Relace uspořádání se zpravidla značí „ $\leq$ “. Některé množiny se označují za částečně uspořádané, pokud libovolný prvek množiny lze relací uspořádání porovnat alespoň s jedním jiným prvkem této množiny a zároveň nelze mezi sebou porovnat všechny dvojice prvků množiny. Pokud lze relaci uspořádání aplikovat pro všechny dvojice prvků množiny, hovoříme o tzv. úplném uspořádání.

Uspořádání lze graficky znázornit pomocí Hasseova diagramu. Každé dva prvky, které spojuje cesta v jednom směru (shora dolů nebo zdola nahoru), jsou vzájemně porovnatelné. Zvykem je menší prvek zakreslit níže. Příklady na obrázku reprezentují lineární uspořádání a částečně uspořádanou množinu (konkrétně uspořádání dělitelnosti).



Obr. 16: Příklad lineárního uspořádání a částečně uspořádané množiny (tzv. poset)

Hodnotící stupnice definované normou a používané v průmyslu jsou lineárně uspořádané. Praktickým využitím částečně uspořádané množiny v semikvantitativním hodnocení může být například hodnocení různorodých následků pomocí jedné stupnice.

Při hodnocení semikvantitativní metodou vybírá analytik jednu z n možností, která nejvíce koresponduje s hodnoceným faktorem nežádoucí události. Protože se jedná o odborné odhady, nejsou jednotlivé stupně zadány intervalem s přesnými hraničními hodnotami, ale

¹¹

Reflexivita – pro libovolný prvek x z množiny A platí: xRx

Antisymetrie – pro libovolné prvky x, y z množiny A platí: $xRy \wedge yRx \rightarrow x=y$

Tranzitivita – pro libovolné prvky x, y, z z množiny A platí: $xRy \wedge yRz \rightarrow xRz$



slovním ohodnocením (např. stupnice pro hodnocení následků) nebo přibližnou hodnotou (řádová nebo zaokrouhlená hodnota na jednu platnou číslici – stupnice pro hodnocení pravděpodobnosti). Přiřazení hraničních hodnot intervalům nemá v semikvantitativním hodnocení smysl právě kvůli odhadům. Při dostupnosti přesných vstupních hodnot je vždy lepší provést výpočet plně kvantitativně. Z tohoto důvodu budou jednotlivé stupně hodnotících škál dále reprezentovány jednou zástupnou hodnotou.

Aritmetická stupnice (lineární)

Aritmetická stupnice je jednoznačně dána např. dvěma po sobě jdoucími členy. Rozdíl, o kolik se následující prvek liší od předcházejícího, se nazývá difference (značíme d) a je pro celou stupnici konstantní. Aritmetická stupnice je tedy popsána takto:

$$a_i = a_{i-1} + d, \text{ přičemž první člen posloupnosti je } a_1. \quad (3)$$

Alternativní vztah pro výpočet i -tého členu je:

$$a_i = a_1 + (i - 1)d, \quad (4)$$

kde $i \in \{2, 3, \dots, n\}$, n je velikost stupnice.

Pokud předpokládáme, že hodnocené faktory nabývají pouze kladných reálných hodnot (pravděpodobnost, následky i odhalitelnost nemohou nabývat hodnot záporných) a dále $a_1 = d$, pak můžeme psát:

$$a_i = a_1 \cdot i \text{ nebo analogicky } a_i = d \cdot i \quad (5)$$

Tab. 6: Příklad aritmetické stupnice odhalitelnosti

i	Hodnota ve stupnici	1	2	3	4	5
a_i	Odpovídající zástupná hodnota	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0

Použití lineární hodnotící stupnice má výhodu ve snadné transformaci do zástupných hodnot. Je vhodná např. pro hodnocení faktoru odhalitelnosti za předpokladu, že pravděpodobnostní rozdělení odhalitelnosti hodnocených nežádoucích událostí je na intervalu $< 0; 1 >$ přibližně rovnoměrné.

Geometrická stupnice

Geometrická stupnice je jednoznačně dána dvěma po sobě jdoucími členy nebo členem a tzv. kvocientem, který vyjadřuje poměr mezi dvěma sousedními členy stupnice. Tento kvocient značíme q . Geometrická stupnice je tedy popsána takto:

$$a_i = a_{i-1} \cdot q, \quad (6)$$

kde první člen posloupnosti označíme a_1 .

Alternativní vztah pro výpočet i -tého členu je:

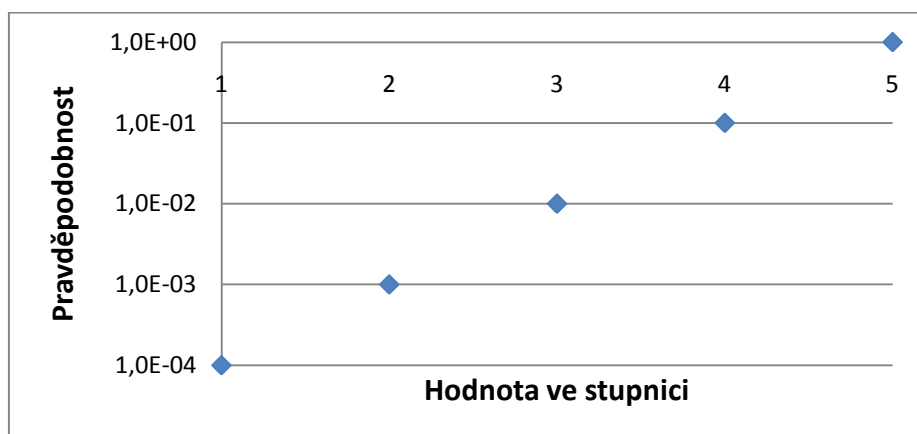
$$a_i = a_1 \cdot q^{i-1}, \quad (7)$$

kde $i \in \{2, 3, \dots, n\}$, n je velikost stupnice.

Příklad takovéto stupnice pro hodnoty $a_1 = 1 \cdot 10^{-4}$; $q = 10$ je v následující tab. 7 a graficky zobrazena na obr. 17.

Tab. 7: Příklad geometrické stupnice pravděpodobnosti

i	Hodnota ve stupnici	1	2	3	4	5
a_i	Odpovídající zástupná hodnota	1,0E-04	1,0E-03	1,0E-02	1,0E-01	1



Obr. 17: Příklad geometrické stupnice pravděpodobnosti

Při semikvantitativním přístupu bývá primárním účelem porovnání hodnocených událostí a absolutní velikost hodnoty pravděpodobnosti nebo jiných hodnocených faktorů tak není pro porovnání podstatná. V těchto případech je výhodné zástupnou hodnotu vyjádřit ve tvaru $a_i = C \cdot q^i$, kde C je konstanta nabývající hodnotu $C = \frac{a_1}{q}$. Tuto konstantu lze pak

zanedbat a položit ji tedy rovnu jedné. Výhoda použití geometrické stupnice je především v možnosti bodově rozlišit řádově rozdílné hodnoty. Řádově rozmanitý vstup by způsobil u lineární stupnice velmi nerovnoměrné rozdělení četnosti bodových ohodnocení ve stupnici.

Stupnice s degresivním nárůstem

Posloupnost s degresivním nárůstem může vycházet například z aritmetické posloupnosti, kde difference není konstantní hodnota, ale funkce závislá na proměnné i . Podmínkou je, aby hodnota difference s rostoucím i klesala a zároveň byla kladná. Další variantou může být a_i jako logaritmická funkce i , kdy základ logaritmu je větší než 1.

Tab. 8: Příklad stupnice s degresivním nárůstem pravděpodobnosti

i	Hodnota ve stupnici	1	2	3	4	5
a_i	Odpovídající zástupná hodnota	0,40	0,70	0,85	0,93	0,96



Obr. 18: Příklad stupnice s degresivním nárůstem pravděpodobnosti

3.3 Analýza stávajících postupů

Riziko v semikvantitativně prováděné analýze FMECA lze určit pomocí rizikového čísla RPN , nebo pomocí matice rizika. V obou případech přiřazujeme hodnoceným faktorům jeden ze stupňů daných hodnotícími stupnicemi. V této kapitole je provedena analýza korektnosti výpočtu rizikového čísla a analýza vhodnosti použití matice rizika. Pomocí postupů uvedených níže lze obdobnou analýzu provést pro libovolné hodnotící stupnice, které jsou obsahem přílohy 1, nebo libovolnou matici rizika.



3.3.1 Analýza postupu hodnocení pomocí RPN

Pro srovnání kvantitativního rizika a rizika vypočteného pomocí bodových stupnic musí být každé bodové hodnotě všech stupnic přiřazena zástupná kvantitativní hodnota reprezentující celý interval.

Tab. 9: Příklad přiřazení intervalu kvantitativních hodnot a jejich zástupných hodnot pro bodové hodnocení

Odhalitelnost	Kritéria: Pravděpodobnost detekce při řízení návrhu	Bodové hodnocení	Interval kvantitativních hodnot	Zástupná kvantitativní hodnota
Středně vysoká	Je středně vysoká šance, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	4	0,60 až 0,70	0,65
Střední	Je střední šance, že se při řízení návrhu bude detekovat potenciální příčina/mechanismus a následný způsob poruchy	5	0,50 až 0,60	0,55

Existují různé varianty kombinací hodnotících stupnic, dvě nejpoužívanější varianty jsou uvedeny a zhodnoceny v následujících odstavcích.

ČSN EN 60812:2006

Hodnotící stupnice této normy jsou uvedeny v tab. 2-4, v této části je však podstatná samotná struktura stupnic daná zástupnými hodnotami. U stupnice pravděpodobnosti je její zástupná hodnota jednoznačně přiřazena, viz poslední sloupec v tab. 2. U stupnic odhalitelnosti a následků je nutné strukturu stupnice odvodit ze slovního hodnocení. Vzhledem k tomu, že prostřední ohodnocení na stupnici odhalitelnosti mají v popisu kritéria „střední šance odhalení“, lze je transformovat na cca 50% pravděpodobnost odhalení. Ostatní stupně již není možné takto přiřadit, lze se však domnívat, že je stupnice přibližně aritmetická, tedy stupeň 1 odpovídá 95% šanci odhalení, stupeň 2 odpovídá 85% šanci odhalení atd.

Zatímco hodnoty pravděpodobnosti a odhalitelnosti mohou nabývat pouze hodnot v intervalu $< 0; 1 >$, hodnocení následků není obecně shora omezené. Stupnice pro hodnocení následků navíc nemá ve slovním popisu jednotlivých bodových stupňů kvantifikaci (kromě stupňů 2, 3 a 4, ve kterých se píše o počtu zákazníků, kteří zpozorují skřípající nebo chrastící objekt). Charakter stupnice tedy nelze exaktně určit. Absolutní rozdíly mezi sousedními



úrovněmi stupnice nejsou konstantní, např.:

2 - *Skřípající a chrastící objekt, vadu zpozorují nároční zákazníci*

3 - *Skřípající a chrastící objekt, vadu zpozoruje 50% zákazníků*

oproti

8 - *Objekt není provozuschopný (ztráta základní funkce)*

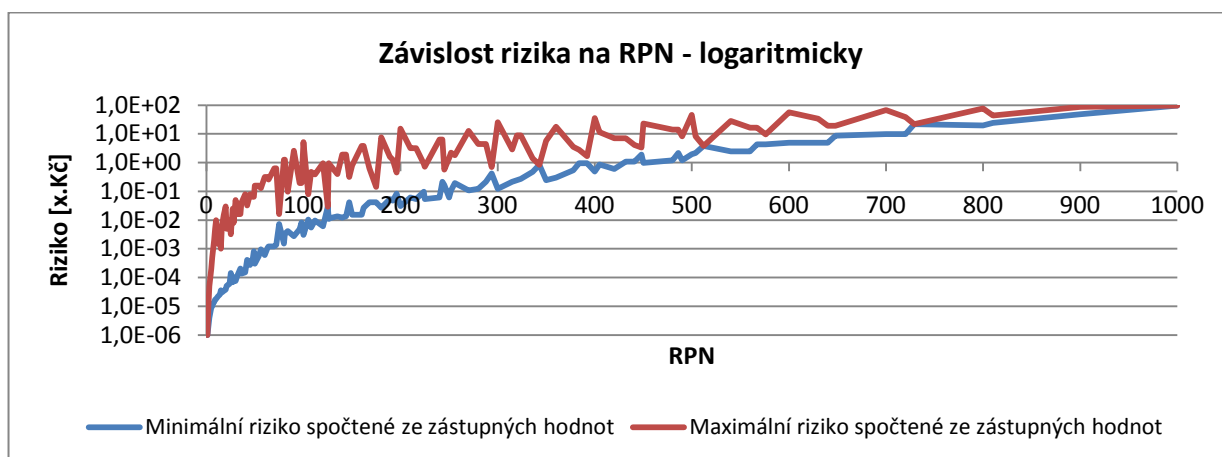
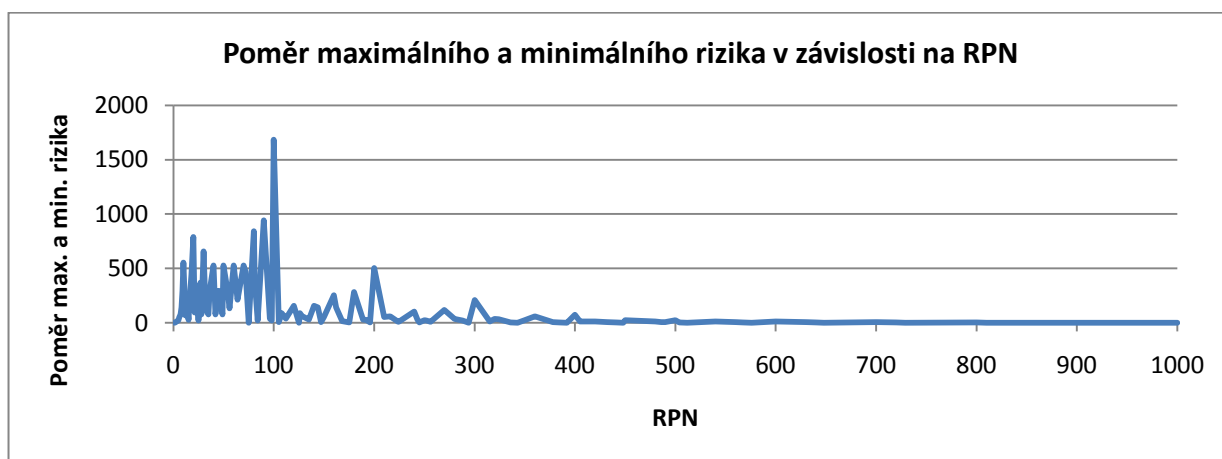
9 - *Způsob poruchy ovlivňuje bezpečnost nebo způsobí nesoulad s vládními předpisy*

čímž je možné vyloučit, že stupnice je daná aritmetickou posloupností. Zda se jedná o stupnici danou geometrickou posloupností nelze potvrdit ani vyvrátit, záleží i na interpretaci jednotlivých stupňů samotným analytikem. Pro další část práce budeme uvažovat stupnici danou geometrickou posloupností s kvocienem $q = 2$, tzn., že událost ohodnocená stupněm 4 bude mít přibližně $2 \times$ větší následky než událost ohodnocená stupněm 3, či $4 \times$ větší následky než událost ohodnocená stupněm 2.

Tab. 10: Přiřazení zástupných hodnot bodovým klasifikačním stupnic

Klasifikace	Pravděpodobnost	Odhalitelnost	Následky [Kč]
1	1,0E-05	0,95	$k \cdot 2^1$
2	1,0E-04	0,85	$k \cdot 2^2$
3	5,0E-04	0,75	$k \cdot 2^3$
4	1,0E-03	0,65	$k \cdot 2^4$
5	2,0E-03	0,55	$k \cdot 2^5$
6	5,0E-03	0,45	$k \cdot 2^6$
7	1,0E-02	0,35	$k \cdot 2^7$
8	2,0E-02	0,25	$k \cdot 2^8$
9	5,0E-02	0,15	$k \cdot 2^9$
10	1,0E-01	0,05	$k \cdot 2^{10}$

Grafy na obr. 19 zobrazují závislost rizika vypočteného ze zástupných hodnot na RPN vypočteném pomocí bodových ohodnocení. Protože jedno rizikové číslo RPN může vzniknout různými bodovými kombinacemi hodnocených faktorů, je vynesena křivka minimálního a maximálního rizika. Druhý graf (obr. 20) zobrazuje poměr maximální a minimální hodnoty rizika pro dané rizikové číslo RPN . Přestože je RPN diskrétní veličina, jsou následující funkce pro přehlednost zobrazeny jako spojité.


Obr. 19: Závislost rizika na *RPN*

Obr. 20: Poměr maximálního a minimálního rizika v závislosti na *RPN*

Na obr. 20 vidíme, že v první desetinně rozsahu rizikových čísel *RPN*, tedy v intervalu $\{1, \dots, 100\}$, kde se v praxi vyskytuje nejvíce ohodnocených událostí (viz obr. 14), se vyskytují poměrově největší rozdíly mezi minimálními a maximálními možnými hodnotami rizika.

Poměrová funkce dosahuje maxima pro hodnotu $RPN = 100$, kdy minimální riziko nabývá hodnoty cca $3 \cdot 10^{-3} \cdot k$ Kč (vstupní hodnoty $P = 2$; $O = 10$; $N = 5$) a maximální riziko nabývá hodnoty cca $5 \cdot k$ Kč (vstupní hodnoty $P = 10$; $O = 1$; $N = 10$).

Grafy jsou výstupem programu, jehož zdrojový kód je v příloze 2.

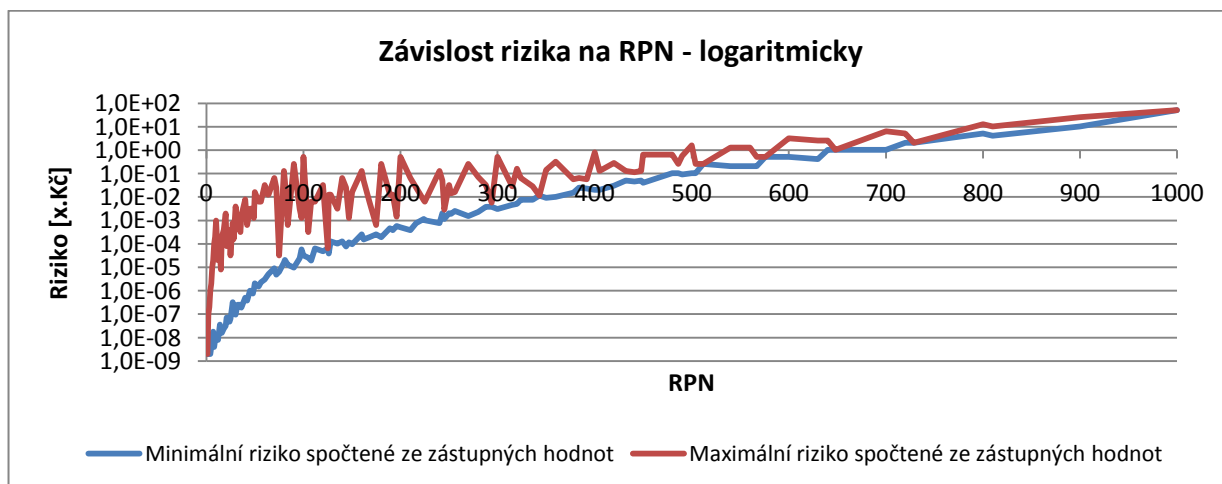
VDA-Vol4 Product FMEA

Tato varianta odpovídá stupnicím uvedeným v normě VDA-Vol4, používané automobilovým koncernem Volkswagen Group. Stupnice jsou uvedeny v příloze 1. U stupnice pravděpodobnosti a odhalitelnosti je zástupná hodnota jednotlivých bodových hodnocení jednoznačně přiřazena, stupnice následků bude aproximována geometrickou posloupností s kvocientem $q = 2$, a to ze stejných důvodů jako u normy ČSN EN 60812:2006 - viz výše.

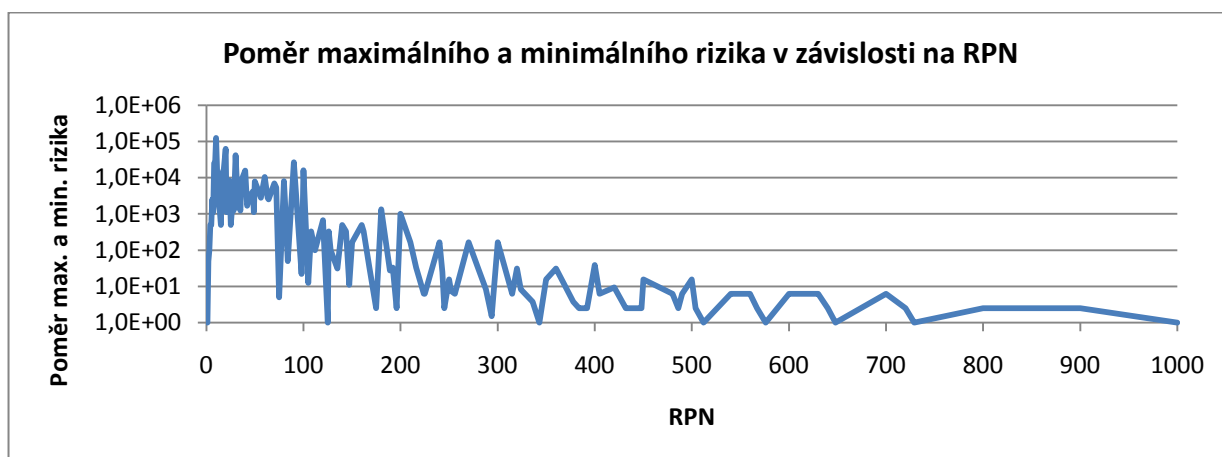
Tab. 11: Přiřazení zástupných hodnot bodovým klasifikacím

Klasifikace	Pravděpodobnost	Odhalitelnost	Následky [Kč]
1	1,0E-06	0,999	$k \cdot 2^1$
2	5,0E-05	0,999	$k \cdot 2^2$
3	1,0E-04	0,999	$k \cdot 2^3$
4	5,0E-04	0,999	$k \cdot 2^4$
5	1,0E-03	0,998	$k \cdot 2^5$
6	5,0E-03	0,997	$k \cdot 2^6$
7	1,0E-02	0,991	$k \cdot 2^7$
8	5,0E-02	0,98	$k \cdot 2^8$
9	1,0E-01	0,96	$k \cdot 2^9$
10	5,0E-01	0,90	$k \cdot 2^{10}$

Graf na obr. 21 zobrazuje závislost vypočteného rizika ze zástupných hodnot na hodnotách RPN. Protože jedno rizikové číslo může vzniknout různými kombinacemi hodnocených faktorů, je vynesena křivka minimálního a maximálního rizika. Druhý graf (obr. 22) zobrazuje poměr maximální a minimální hodnoty rizika pro dané RPN. Přestože je RPN diskrétní veličina, jsou následující funkce pro přehlednost zobrazeny jako spojitě.



Obr. 21: Závislost rizika na RPN



Obr. 22: Poměr maximálního a minimálního rizika v závislosti na RPN

Z grafu na obr. 22 vidíme, že poměr maximálního a minimálního rizika dosahuje až řádu desítek tisíc (pro $RPN = 10$ dokonce statisíců). Při takovýchto rozptylech možného rizika pro jednotlivá RPN může být výstup velmi zkreslený, například událost ohodnocená rizikovým číslem $RPN = 100$ může představovat vyšší riziko než událost s $RPN = 512$.

Zhodnocení

Z výše uvedených grafů je na první pohled zřejmé, že stávající postup hodnocení a vyhodnocení nežádoucích událostí dává velmi zkreslené výsledky v podobě RPN . K jednotlivým RPN není možné jednoznačně přiřadit hodnotu rizika, ale pouze jeho minimální a maximální hodnotu. Minimální ani maximální hodnota rizika v závislosti na rostoucím RPN není rostoucí funkcí, tím lze předem vyloučit schopnost RPN korektně porovnat dvě hodnocené události.

V příloze 1 jsou uvedeny další používané hodnotící stupnice. Vysvětlující popis jednotlivých bodových hodnocení je ve většině případů natolik vágní, že nelze charakter stupnic určit jako u dvou výše uvedených případů. S jistotou lze však tvrdit, že žádná trojice stupnic (pravděpodobnost, odhalitelnost, následky) není taková, aby všechny stupnice byly tvořeny aritmetickou posloupností. Pouze tato varianta by totiž zajistila stejné pořadí hodnocených nežádoucích událostí dle RPN i dle rizika spočteného ze zástupných hodnot.



3.3.2 Analýza postupu hodnocení pomocí matice kritičnosti

Matice kritičnosti/rizika je velmi jednoduchým nástrojem pro zhrubé určení rizika. Jedná se o dvourozměrné pole. Z toho je zřejmé, že se vždy omezujeme na hodnocení dvou faktorů, tedy pravděpodobnosti a následků. Sestrojení vícerozměrné matice je pochopitelně teoreticky možné, pro praxi však téměř nepoužitelné. Vícerozměrnou matici je tak vhodné nahradit výpočtem *RPN*.

Existuje mnoho variant matic pro hodnocení rizika, lišící se v počtu stupňů pro stanovení pravděpodobnosti a následků, ale dokonce i v principu obarvování jednotlivých polí. Stupňům pravděpodobnosti jsou často přiřazeny konkrétní zástupné hodnoty nebo intervaly hodnot, stupně následků pak mají pouze slovní popis.

ČSN EN 60812:2006

Matice kritičnosti z obr. 8 rozděluje výsledné riziko do 4 oblastí: zanedbatelné, přípustné, nežádoucí a nepřípustné. Pokud se stupňům pravděpodobnosti přiřadí namísto intervalu jedna konkrétní zástupná hodnota a stupňům následků charakter stupnice, je možné určit, zda obarvení polí odpovídá riziku spočteného ze zástupných hodnot, tzn., že riziko méně závažně ohodnocené události nepřesáhne riziko události se závažnějším ohodnocením. Stupnice následků se bude opět předpokládat jako geometrická, v tomto případě však s neznámým kvocientem q . Zástupné hodnoty pravděpodobnosti a následků byly přiřazeny následujícím způsobem.

Tab. 12: Přiřazení zástupných hodnot hodnotícím stupňům

Hodnotící stupeň	Pravděpodobnost	Následky
1	0,0005	$k \cdot q^1$
2	0,005	$k \cdot q^2$
3	0,05	$k \cdot q^3$
4	0,15	$k \cdot q^4$
5	0,5	nedefinováno

Jednoduchým porovnáním hodnot výsledného rizika bylo zjištěno, že způsob obarvení matice z obr. 8 je korektní pouze pro hodnoty intervalu $q \in \{6, 7, 8, 9, 10\}$, pokud se omezíme na $q \in \mathbb{Z}$. Kritérium pro korektní obarvení stupnice pro daná q je:

„Maximální hodnota rizika spočteného ze zástupných hodnot nesmí být u daného obarvení (slovním popisu rizika) vyšší než libovolná z hodnot rizika závažnějšího obarvení“



Například pro $q = 3$ a zanedbání konstanty ($k = 1$) není stávající obarvení matice korektní, protože „zanedbatelné“ riziko u kombinace „Velmi slabý výskyt nevýznamné závažnosti“ má vyšší hodnotu zástupného rizika než „přípustné“ riziko u kombinace „Nepravděpodobný výskyt kritické závažnosti“.

Četnost výskytu důsledku poruchy	Úrovně závažnosti			
	1 Nevýznamná	2 Nízká	3 Kritická	4 Katastrofická
5: Častý výskyt	0,5	1,5	4,5	13,5
4: Pravděpodobný výskyt	0,15	0,45	1,35	4,05
3: Občasný výskyt	0,05	0,15	0,45	1,35
2: Velmi slabý výskyt	0,005	0,015	0,045	0,135
1: Nepravděpodobný výskyt	0,0005	0,0015	0,0045	0,0135

Legenda

Zanedbatelné	Přípustné	Nežádoucí	Nepřípustné
--------------	-----------	-----------	-------------

Obr. 23: Riziko spočtené ze zástupných hodnot pro $q = 3$

Zhodnocení

Použití matice kritičnosti/rizika lze doporučit v případech, kdy je dostačující hodnocení dvou parametrů. Pro obarvení matice rizikovými stupni je nezbytné, aby bylo navrženo na základě jednotlivých stupňů pro hodnocení kritérií, nikoliv intuitivně. Matice uvedená v normě [1] je na základě výše uvedené analýzy použitelná bez úpravy za předpokladu geometrického charakteru stupnice s kvocientem v rozmezí 6 až 10 včetně krajních hodnot.

3.4 Metodika výpočtu výsledného rizikového čísla

Ohodnocení faktorů semikvantitativní analýzy FMECA je nutné nějakým způsobem zpracovávat a vyhodnocovat, bez tohoto je dostačující analyzovat systém pouze jednodušší a rychlejší metodou FMEA.

Pokud se hodnotí normou dané faktory, je výpočet RPN dán jednoznačně funkcí:

$$RPN = f_P(P) \cdot f_N(N), \quad (8)$$

pro hodnocení 2 faktorů (pravděpodobnost a následky) a



$$RPN = f_P(P) \cdot f_O(O) \cdot f_N(N), \quad (9)$$

pro hodnocení 3 faktorů (pravděpodobnost, odhalitelnost a následky).

Funkce f_P , f_O , f_N (označme obecně $f_\bullet$) jsou pak funkcemi podle charakteru hodnotících stupnic. Pro aritmetickou stupnici je funkce dána jako $f_\bullet(i) = a_{\bullet 1} + (i - 1) \cdot d_\bullet$; pro geometrickou stupnici pak $f_\bullet(i) = a_{\bullet 1} \cdot q_\bullet^{i-1}$ atd. Výpočet RPN jako takový je triviální záležitostí, jedná se o součin jednoduchých funkcí, v tomto případě lineárních a exponenciálních. Zpětné stanovení konstant z již stanovených stupnic však vyžaduje místo určení charakteru stupnice přesnou kvantifikaci ke všem semikvantitativním hodnocením.

Předpokládejme, že stupnice volíme (případně jsou již zvoleny) tak, aby v aritmetické stupnici $d_\bullet = a_{\bullet 1}$. Lineární funkce je pak ve tvaru $f_\bullet(i) = a_{\bullet 1} \cdot i$. Při semikvantitativním hodnocení je důležité výsledné pořadí hodnocených událostí (poruchových stavů), nikoliv přesná hodnota RPN . Výsledné pořadí tedy nezáleží na absolutních hodnotách $a_{\bullet 1}$. Z tohoto dále platí, že pro aritmetickou stupnici je tedy dostačující použít zástupnou funkci $f_\bullet(i) = i$, pro geometrickou stupnici $f_\bullet(i) = q_\bullet^i$.

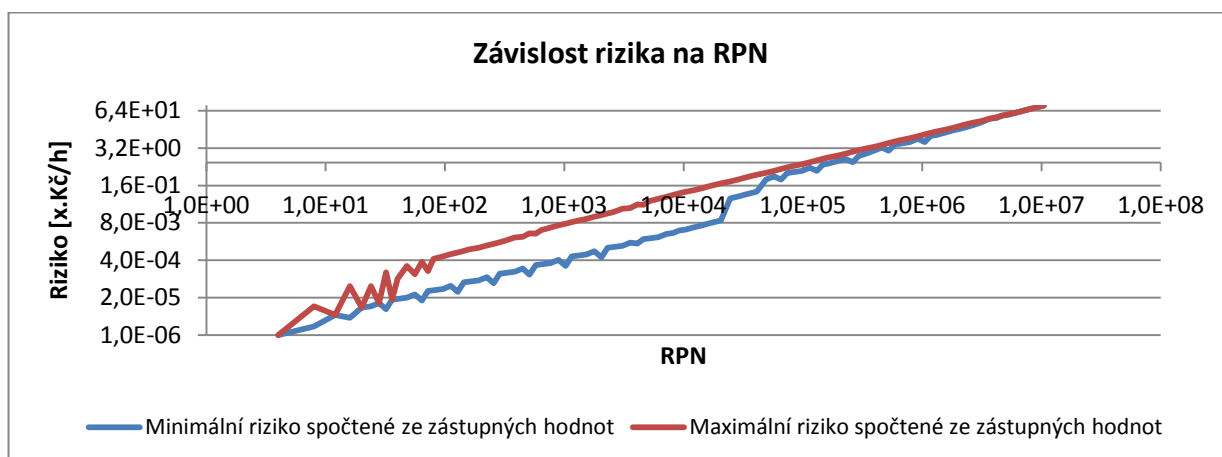
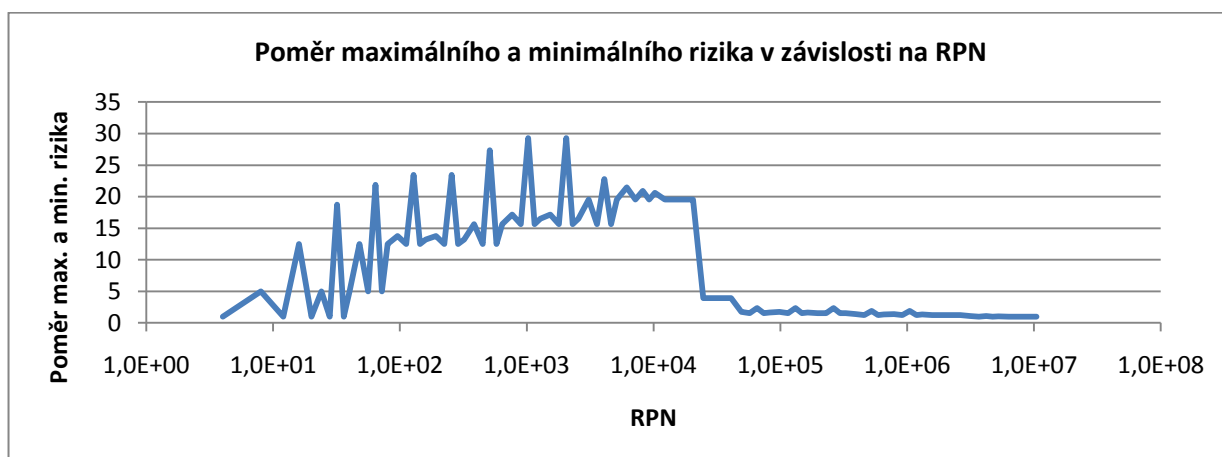
ČSN EN 60812:2006

Jak již bylo uvedeno v kapitole 3.3.1, stupnice hodnocení pravděpodobnosti a následků odpovídají přibližně geometrické posloupnosti se základem 2, stupnice hodnocení odhalitelnosti je lineární.

Výsledný výpočet RPN tedy odpovídá vztahu:

$$RPN = 2^P \cdot O \cdot 2^N \quad (10)$$

Změnou výpočtu se zároveň mění rozsah RPN , který je v tomto případě $2^1 \cdot 1 \cdot 2^1 = 4$ až $2^{10} \cdot 10 \cdot 2^{10} \cong 10^7$. Při zobrazení průběhu závislosti rizika na RPN se vzhledem k použití stejných zástupných hodnot k bodovým ohodnocením (viz tab. 10) rozsah funkčních hodnot nemění. Důležitá je změna průběhu funkce a poměr mezi maximálním a minimálním rizikem u jednotlivých RPN . Funkce jsou na rozdíl od původního výpočtu RPN při proložení křivkou hladší, viz následující grafy.


Obr. 24: Závislost rizika na *RPN*

Obr. 25: Poměr maximálního a minimálního rizika v závislosti na *RPN*

VDA-Vol4 Product FMEA

Stupnice hodnocení pravděpodobnosti, odhalitelnosti a následků odpovídají přibližně geometrické posloupnosti se základem 2.

Výsledný výpočet *RPN* odpovídá vztahu:

$$RPN = 2^P \cdot 2^O \cdot 2^N \quad (11)$$

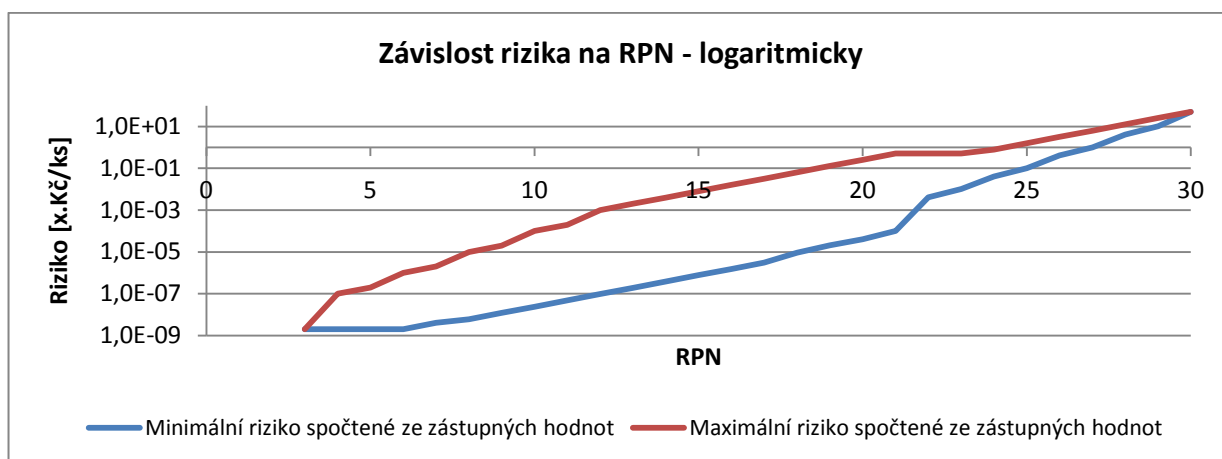
Tento vztah lze nyní upravit na:

$$RPN = 2^{P+O+N} \quad (12)$$

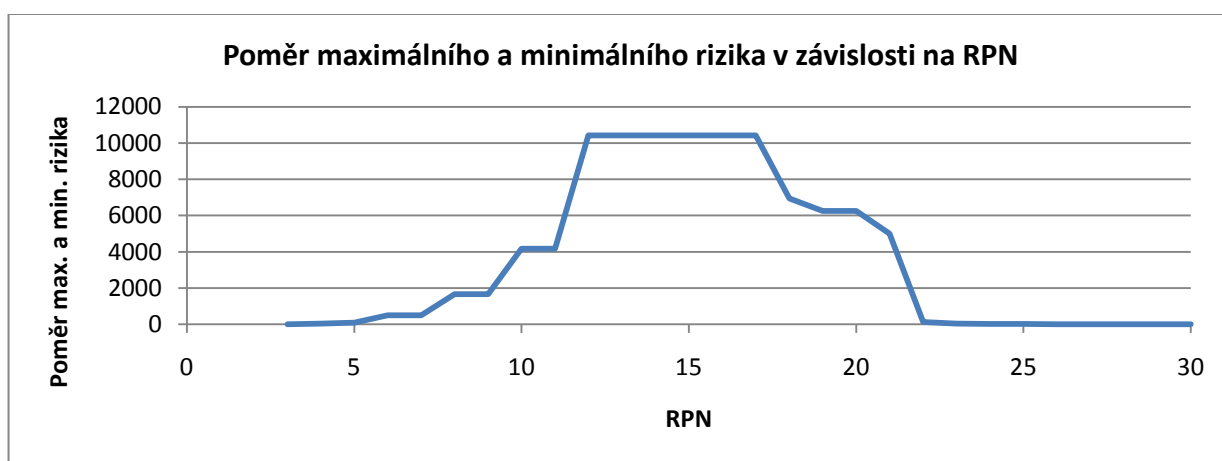
Jak již bylo zmíněno, úkolem *RPN* je pouze stanovení pořadí hodnocených událostí. K tomuto účelu je tedy možné rizikové číslo *RPN* počítat pouze jako prostý součet dílčích bodových hodnocení:

$$RPN = P + O + N \quad (13)$$

Změnou výpočtu se opět mění rozsah *RPN*, v tomto případě od $1 + 1 + 1 = 3$ do $10 + 10 + 10 = 30$. Stejně jako v předcházející části, která navrhuje výpočet rizikového čísla pro stupnice normy ČSN, platí, že vzhledem k použití stejných zástupných hodnot k bodovým ohodnocením (viz tab. 11) se rozsah funkčních hodnot nemění a funkce jsou na rozdíl od původního výpočtu *RPN* při proložení křivkou hladší - viz následující grafy.



Obr. 26: Závislost rizika na *RPN* – osa y logaritmicky



Obr. 27: Poměr maximálního a minimálního rizika v závislosti na *RPN*

3.5 Porovnání stávajících a doporučených postupů

Pomocí hodnot z výše uvedených grafů lze porovnat stávající a doporučený postup na základě více kritérií. Od křivky závislosti rizika na rizikovém číslu RPN očekáváme, že bude neklesající (v ideálním případě rostoucí). Kritériem tak může být například počet úseků funkce (definovaných dvěma sousedními body), které jsou klesající. Mějme množinu o 120 prvcích z poznámky pod čarou 8, která obsahuje taková čísla z množiny $\{1, \dots, 1000\}$, která mohou být hodnotami RPN . Množinu označme M_{RPN} a její prvky m_i . Výše uvedené kritérium pro klesající úseky formalizujeme vztahem:

$$f(m_i) > f(m_{i+1})$$

V případě, že jednotlivá RPN mohou nabývat více hodnot a je tedy možné vynést křivku minimálního a maximálního rizika, měla by být splněna i následující podmínka:

$$f_{\max}(m_i) < f_{\min}(m_i),$$

kde $f_{\min}$, $f_{\max}$ jsou funkce minimálních, maximálních rizik v závislosti na RPN .

Počet klesajících úseků včetně relativních počtů je uveden v tab. 13 a v tab. 14. Počet úseků je jak pro křivku minimálních hodnot možného rizika pro možná RPN (sloupec Min), tak pro křivku maximálního rizika (sloupec Max) a křivku, která je tvořena body, jež jsou aritmetickým průměrem minimální a maximální hodnoty rizika pro každou hodnotu z RPN .

Tab. 13: Počty klesajících úseků pro funkční závislosti rizika z normy ČSN EN 60812:2006

ČSN EN 60812:2006	Počet klesajících úseků			Relativní počet klesajících úseků		
	Min	Průměr	Max	Min	Průměr	Max
Stávající postup	31	52	52	25,8%	43,3%	43,3%
Nově navržený postup	14	9	8	14,0%	9,0%	8,0%

Tab. 14: Počty klesajících úseků pro funkční závislosti rizika z normy VDA-Vol4

VDA-Vol4 Product FMEA	Počet klesajících úseků			Relativní počet klesajících úseků		
	Min	Průměr	Max	Min	Průměr	Max
Stávající postup	40	56	54	33,3%	46,7%	45,0%
Nově navržený postup	0	0	0	0,0%	0,0%	0,0%

Porovnáním hodnot je evidentní, že při použití nově navržených postupů je pravděpodobnost chybného pořadí hodnocených událostí podstatně nižší.



3.6 Určení průměrné chyby od plně kvantitativního přístupu

3.6.1 Chyba v hodnocení jednoho faktoru

Při použití semikvantitativního hodnocení se automaticky předpokládá, že nebude hodnocená skutečnost postihnuta přesně. Spojitý interval hodnot (v určitých případech může hodnocený faktor nabývat pouze diskrétních hodnot) je tak aproximován do několika diskrétních hodnot dle počtu úrovní hodnotící stupnice.

Pro další úvahy je třeba zavést následující značení:

- x minimální reálně možná hodnota, kterou hodnocený faktor může nabývat,
- y maximální reálně možná hodnota, kterou hodnocený faktor může nabývat,
- a počet úrovní hodnotící stupnice,
- b bodové ohodnocení,
- r kvantitativní hodnota hodnoceného faktoru,
- Δ absolutní chyba bodového hodnocení oproti zástupné hodnotě,
- δ relativní chyba bodového hodnocení oproti zástupné hodnotě.

Aritmetická stupnice na intervalu (0; y)

Nejjednodušší kvantifikace chyby je pro případ, kdy ukazatel může nabývat hodnot v intervalu (0; y), a zároveň hodnotíme aritmetickou stupnicí. Interval se rozdělí na shodné intervaly v počtu daném velikostí hodnotící stupnice, přičemž zástupná hodnota hodnotících stupňů se přiřadí jako střed tohoto intervalu.

Absolutní chybu kvantifikujeme jako:

$$\Delta = \frac{y}{a} \cdot \left(b - \frac{1}{2}\right) - r, \quad (14)$$

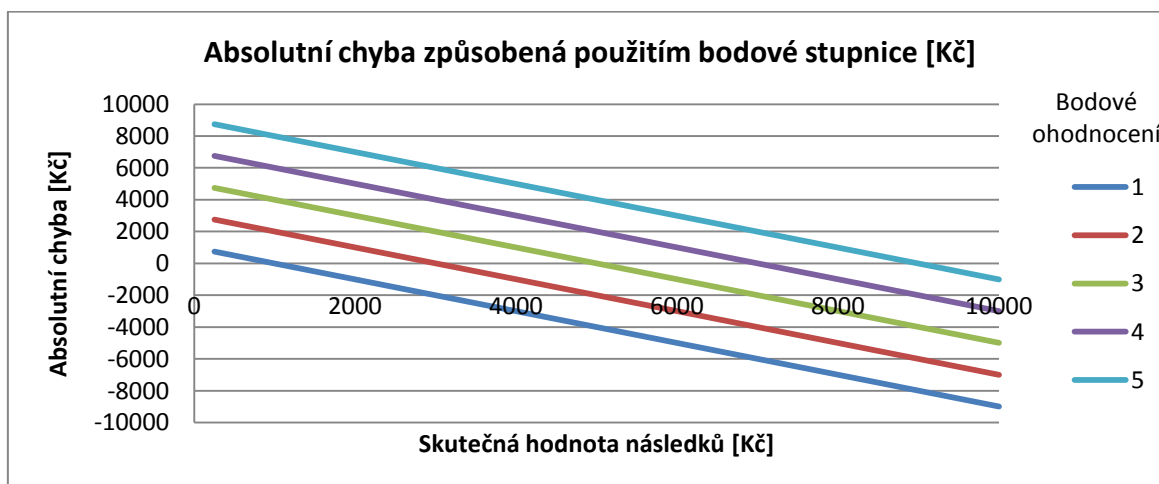
relativní chybu kvantifikujeme jako:

$$\delta = \frac{\frac{y}{a} \cdot \left(b - \frac{1}{2}\right) - r}{r}. \quad (15)$$

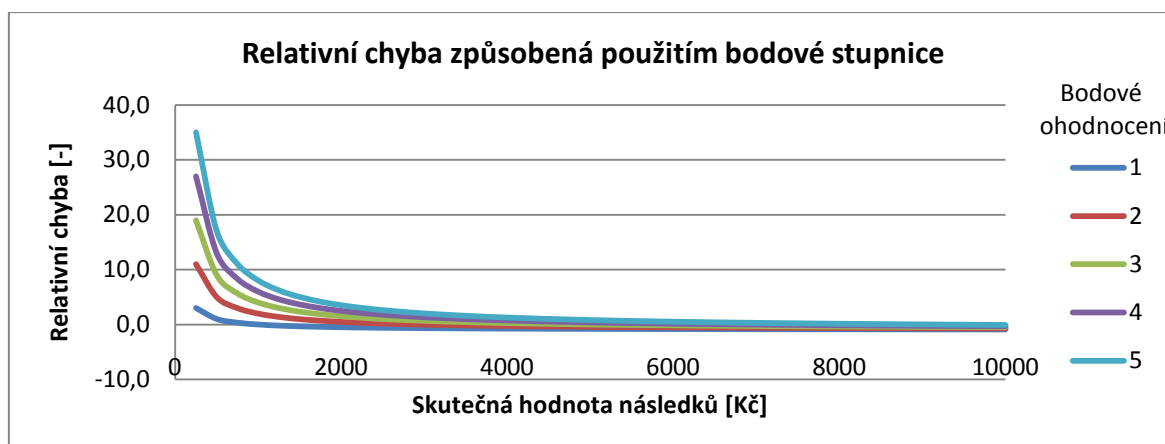
Příklad:

Hodnocený ukazatel, v tomto případě následky poruchového stavu, může nabývat hodnot 0 až 10 000 Kč. Hodnotící stupnice má být pětibodová. Rozsah 0 až 10 000 Kč rozdělíme do pěti intervalů po 2 000 Kč se zástupnou hodnotou ve středu tohoto intervalu následovně:

Bodové ohodnocení	Reálná hodnota od [Kč]	Reálná hodnota do [Kč]	Zástupná hodnota [Kč]	Slovní popis
1	0	2 000	1 000	Zanedbatelné následky
2	2 000	4 000	3 000	Nízké následky
3	4 000	6 000	5 000	Střední následky
4	6 000	8 000	7 000	Vysoké následky
5	8 000	10 000	9 000	Extrémní následky



Obr. 28: Absolutní chyba při použití bodové stupnice



Obr. 29: Relativní chyba při použití bodové stupnice

**Aritmetická stupnice na intervalu $(x; y)$**

Tento případ je obdobou výše uvedeného s rozdílem, že reálná hodnota ukazatele může nabývat obecně hodnot v intervalu $(x; y)$.

Absolutní chybu kvantifikujeme jako:

$$\Delta = \frac{y-x}{a} \cdot \left(b - \frac{1}{2}\right) + x - r, \quad (16)$$

relativní chybu kvantifikujeme jako:

$$\delta = \frac{\frac{y-x}{a} \cdot \left(b - \frac{1}{2}\right) + x - r}{r}. \quad (17)$$

Geometrická stupnice $(0; y)$

Všechny stupnice doporučené normou VDA-Vol4 a stupnice pravděpodobnosti a následků z normy ČSN EN 60812:2006 lze v reálných zástupných hodnotách aproximovat geometrickou stupnicí. Předpokládá se, že hodnocené ukazatele nabývají hodnot $(0; y)$. Zástupné hodnoty jsou ve tvaru $k \cdot q^b$, kde

k konstanta, nabývající hodnoty $\frac{y}{q^{a+\frac{1}{2}}}$

q kvocient geometrické posloupnosti.

Absolutní chybu kvantifikujeme jako:

$$\Delta = k \cdot q^b - r, \quad (18)$$

relativní chybu kvantifikujeme jako:

$$\delta = \frac{k \cdot q^b - r}{r}. \quad (19)$$

3.6.2 Chyba v celkovém vyhodnocení dle VDA-Vol4

Do výsledného rizika se při hodnocení třech ukazatelů promítají tři chyby odpovídající třem hodnoceným faktorům, kterých se zjednodušením na semikvantitativní hodnocení dopouštíme. Pro kvantifikaci chyby budeme předpokládat, že hodnotitel vždy přiřadí bodové ohodnocení, které nejlépe vystihuje danou skutečnost, tedy ukazatel nabývající hodnotu



v intervalu $(q^{b-\frac{1}{2}}; q^{b+\frac{1}{2}})$ ohodnotí stupněm b . To platí vyjma prvního a posledního hodnotícího stupně. Pro první stupeň je dolní hranice intervalu nulová, pro poslední stupeň je horní hranice intervalu rovna jedné pro hodnocení pravděpodobnosti a odhalitelnosti a shora neomezená pro hodnocení následků. Atypické vlastnosti prvního a posledního hodnotícího stupně pro následující vyhodnocení chyby zanedbáme a předpokládáme, že stupnice jsou navrženy tak, aby naprostá většina hodnocení patřila do uvedených intervalů.

Hraniční hodnoty pro prvních 5 stupňů desetiúrovňové stupnice s kvocient $q = 2$ jsou patrné z následující tabulky.

Tab. 15: Hraniční hodnoty jednotlivých bodových hodnocení

Bodové hodnocení	1	2	3	4	5
Interval bodově	(0; 1,5)	(1,5; 2,5)	(2,5; 3,5)	(3,5; 4,5)	(4,5; ∞)
Interval zástupných hodnot ukazatele [.k] pro $q=2$	(1,41; 2,83)	(2,83; 5,66)	(5,66; 11,31)	(11,31; 22,63)	(22,63; ∞)

Bodovému hodnocení b tedy odpovídají reálné hodnoty od $\frac{q^{b-\frac{1}{2}}}{q^b}$ do $\frac{q^{b+\frac{1}{2}}}{q^b}$ (po úpravě interval $(q^{-\frac{1}{2}}; q^{\frac{1}{2}})$) násobku zástupné hodnoty $k \cdot q^b$. Pro vybrané hodnoty q v intervalu 1,5 až 5 vypadají násobky takto:

Tab. 16: Určení intervalů zástupných hodnot pro různé kvocienty q

q	Násobky zástupné hodnoty	
	od	do
1,5	0,82	1,22
2	0,71	1,41
2,5	0,63	1,58
3	0,58	1,73
3,5	0,53	1,87
4	0,50	2,00
4,5	0,47	2,12
5	0,45	2,24

Ve výsledném ohodnocení pomocí *RPN* dochází k chybě, jejíž pravděpodobnostní rozdělení je zobrazeno na následujícím grafu (obr. 30). Chyba je stanovena vzhledem k plně kvantitativnímu výpočtu rizika.

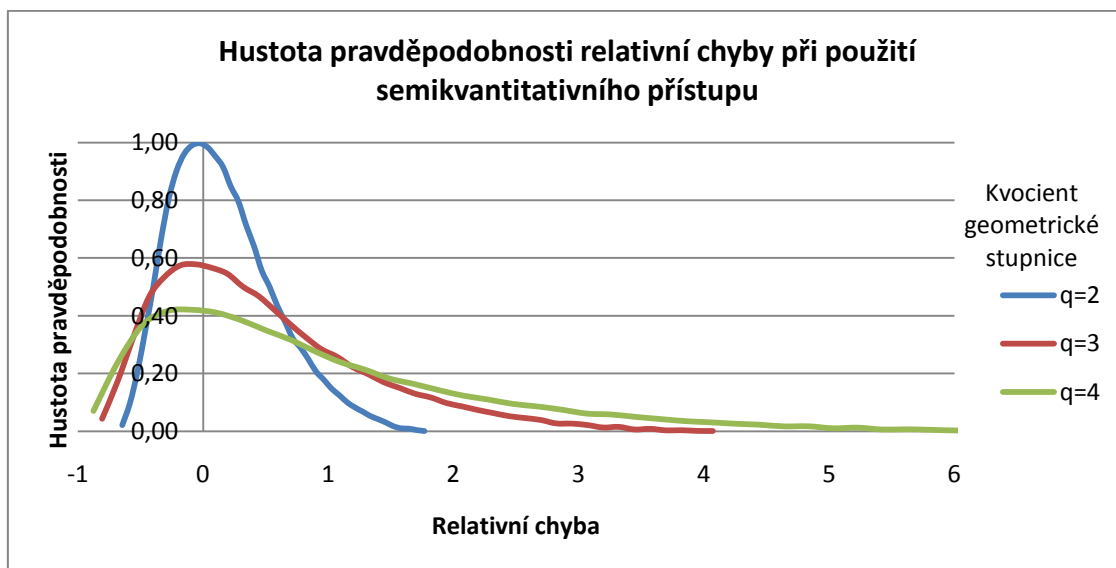
Čím nižší hodnota q , tím vyšší přesnost ohodnocení nežádoucí události. Toto není nijak překvapující, protože s klesající hodnotou kvocientu q roste počet úrovní stupnice, kterou daný interval reálných hodnot daného ukazatele hodnotíme.

Příklad:

Hodnocený ukazatel, například následky poruchového stavu, může nabývat hodnot 0 až 10 000 Kč. Hodnotící stupnice bude mít, za předpokladu ohodnocení prvního stupně reálnou zástupnou hodnotou q , následující počet stupňů:

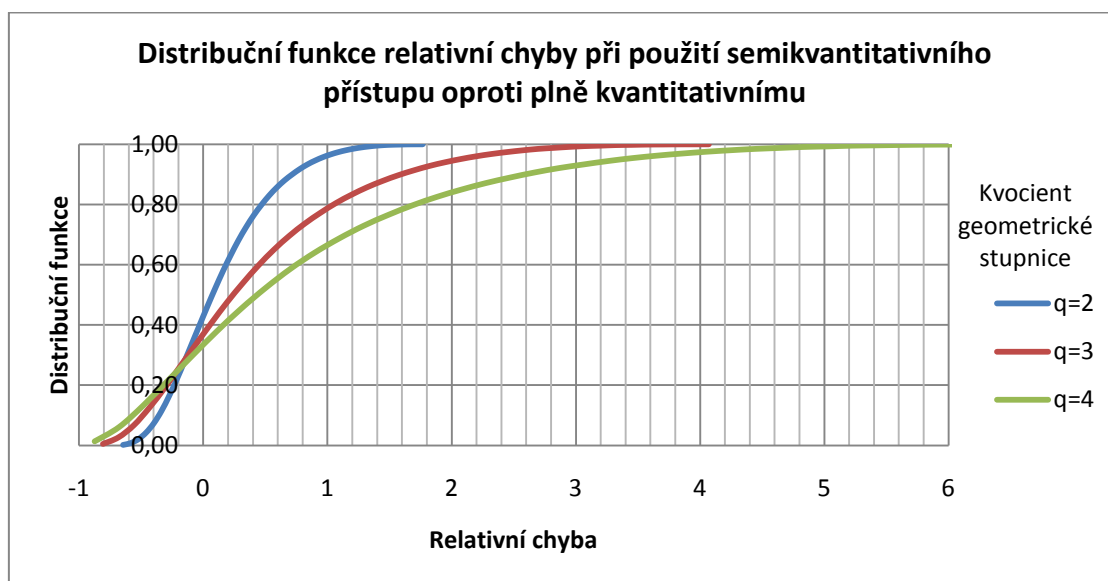
Tab. 17: Určení počtu úrovní stupnice při daném kvocientu q

q	Počet úrovní stupnice
1,5	22
2	13
2,5	10
3	8
3,5	7
4	6
4,5	6
5	5



Obr. 30: Hustota pravděpodobnosti relativní chyby (VDA-Vol4)

S vyšším kvocientem q se dosahuje větší nepřesnosti. Z grafu distribuční funkce lze například odečíst, že s 20% pravděpodobností bude skutečné riziko oproti semikvantitativně vypočtenému přibližně o 50% vyšší při $q = 2$ (o cca 100% při $q = 3$, o cca 170% při $q = 4$).



Obr. 31: Distribuční funkce relativní chyby (VDA-Vol4)

3.7 Případová studie - porovnání postupů

V kapitole 3.5 je porovnání stávajících a navržených postupů pro všechny variace (pro hodnocení *RPN* dle stupnic z VDA-Vol4 jsou dostačující kombinace) vstupních parametrů. Změnu v pořadí je však vhodné prezentovat na praktickém příkladu, protože ani při rozsáhlých analýzách nebývají mezi vstupy všechny teoreticky možné varianty. Jako příklad je uvedena analýza FMECA brzdové destičky osobního automobilu. Analýzou bylo určeno 8 možných poruchových stavů a byly dle hodnotících stupnic VDA-Vol4 ohodnoceny všechny tři faktory, tedy pravděpodobnost, odhalitelnost i následky.

Tab. 18: Část analýzy FMECA brzdové destičky

Poruchový stav	<i>P</i>	<i>O</i>	<i>D</i>	<i>RPN</i>	Pořadí
(a) Hrot detekce opotřebení pod stanovený rozměr	3	5	7	105	3.
(b) Chybný (větší) rozměr matrice	5	4	5	100	4.
(c) Nízké předpětí per	10	2	2	40	8.
(d) Odloučení obložení od matrice	4	7	7	196	1.
(e) Prasklé obložení v celé síle materiálu	1	6	10	60	6.
(f) Přetržení (střih) závlačky	1	10	10	100	4.
(g) Zaleštění plochy (pouze typ organický kevlarový)	5	5	5	125	2.
(h) Zkosení hrany mimo stanovený úhel	4	4	3	48	7.



Modifikací výpočtu *RPN* dle vztahů (12) a (13), získáváme nové pořadí nežádoucích událostí:

Tab. 19: Porovnání pořadí dle nového a stávajícího výpočtu *RPN*

Způsob poruchy	<i>P</i>	<i>O</i>	<i>D</i>	<i>RPN</i>	Nové <i>RPN</i> dle (12)	Nové <i>RPN</i> dle (13)	Pořadí dle:		Rozdíl v pořadí
							<i>RPN</i>	Nové <i>RPN</i>	
(a)	3	5	7	105	32768	15	3.	4.	1
(b)	5	4	5	100	16384	14	4.	6.	2
(c)	10	2	2	40	16384	14	8.	6.	-2
(d)	4	7	7	196	262144	18	1.	2.	1
(e)	1	6	10	60	131072	17	6.	3.	-3
(f)	1	10	10	100	2097152	21	4.	1.	-3
(g)	5	5	5	125	32768	15	2.	4.	2
(h)	4	4	3	48	2048	11	7.	8.	1

Pořadí dle nového *RPN*, které na základě kapitoly 3.3 a 3.4 považujeme za správné, se zásadním způsobem liší. Například nejrizikovější poruchový stav „(f) Přetržení (stříh) závlačky“ je ve stávajícím hodnocení až na čtvrtém místě, s čímž následně souvisí i priorita při aplikaci nápravných opatření ke snížení rizika. S výběrem způsobů poruch pro nápravná opatření souvisí i efektivita investice v tato opatření. Obecně lze totiž předpokládat, že u způsobů poruch s vyšším rizikem lze pomocí nápravných opatření dosáhnout větší absolutní snížení výsledného rizika, které přímo souvisí s průměrnými ročními náklady.

Mezi kvantitativním rizikem a *RPN* spočteným dle vztahu (12) existuje lineární závislost. Z poruchového stavu (f), který je první v pořadí, tedy plyne přibližně 8 krát vyšší riziko než z poruchového stavu (d), který je v pořadí druhý, apod. Obdobné srovnání při stávajícím postupu by nebylo vůbec možné.

3.8 Návrh vícefaktorového modelu

Podnětem k tématu disertační práce byl požadavek Ministerstva dopravy ČR hodnotit kritičnost dopravní infrastruktury. Jedná se o dílčí část hodnocení národní infrastruktury, která kromě dopravní infrastruktury obsahuje i telekomunikace, bankovníctví, energetiku a státní správu.

V současné době není popsána metodika, kterou by na tuto úlohu bylo možné bez úprav aplikovat. Níže navržený postup si proto klade za cíl vytvořit zvládnutelný aparát pro



hodnocení kritičnosti dopravní infrastruktury, který bude vycházet ze systémových postupů aplikovaných v oblasti hodnocení spolehlivosti a rizik.

3.8.1 Popis systému

Hodnocené objekty

Dopravní infrastruktura je v rámci ČR tvořena silniční a železniční sítí, leteckou a vnitrozemskou vodní dopravou. V této práci bude detailně rozpracována pouze metodika hodnocení objektů pro silniční síť, postupy analýzy pro ostatní oblasti lze označit jako metodicky analogické. Typy objektů jsou vybrány na základě struktury mapových podkladů v databázích GIS, které mají sloužit jako jeden ze vstupů pro hodnocení rizika.

Objekty silniční sítě:

- křižovatka
- most
- tunel
- úsek silnice
- železniční přejezd

Typ objektu je v mapových podkladech definován jako bod či linie. Při hodnocení liniových objektů je nutné délku tohoto objektu hodnotitelem zohlednit, není však nutné výsledky analýz vyčleňovat od výsledků bodových objektů.

Nežádoucí události

U vyjmenovaných objektů dopravní infrastruktury se definují libovolné nežádoucí události podle požadavků hodnotitele. Příčinou těchto událostí je běžné opotřebení, nevhodná nebo zcela chybná konstrukce objektu, přírodní jevy či běžná dopravní nehoda. Následkem běžného opotřebení nebo chybné konstrukce objektů je úplná či částečná uzavírka z důvodu rekonstrukce, přírodními vlivy chápeme nežádoucí události jako např. sesuv půdy, náledí, sněhová kalamita atd. Nežádoucí události analyzovaných objektů je možné na základě rizika porovnávat jak globálně, tak v určitých kategoriích podle typu nežádoucí události, kdy získáme přehled, které objekty jsou nejrizikovější pro každou z příčin. Další možnosti výsledného zpracování dat jsou uvedeny v kapitole 3.8.5.



Hodnocené faktory

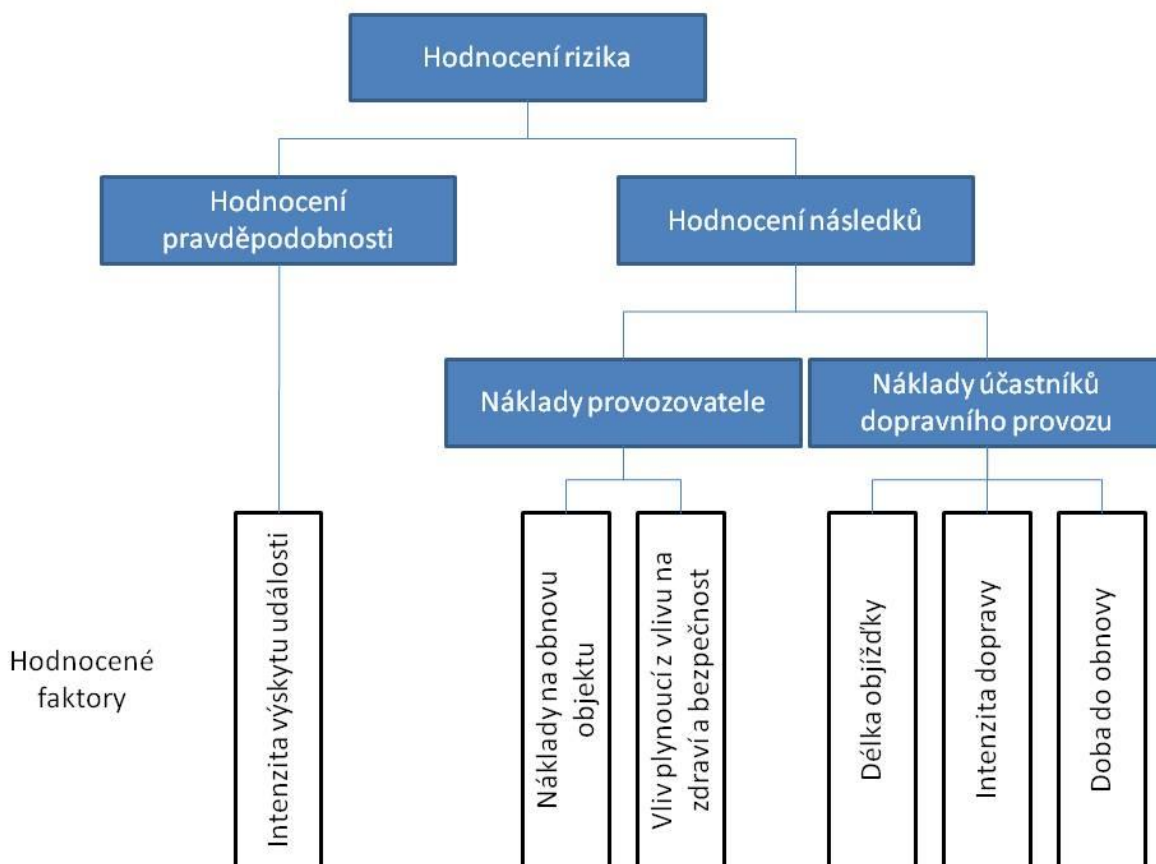
Vzhledem k potřebě hodnotit riziko jako celkové průměrné hodinové náklady v dlouhodobém časovém horizontu jsou zahrnuty všechny důležité faktory, které při poruše objektu způsobují náklady a to bez ohledu na to, zda tyto náklady nese provozovatel nebo účastníci silničního provozu¹². Tyto faktory byly zadavatelem projektu uznány jako dominantní a jejich počet za dostačující. Při hodnocení rizika musí být zachován základní princip kombinace pravděpodobnosti a následků.

Bezrozměrnou pravděpodobnost je vhodné nahradit intenzitou výskytu události, která je standardně vyjádřena v časových jednotkách [h^{-1}] a tak není nutné hodnocený faktor vztahovat k určitému časovému úseku, např. 1 rok.

Hodnocení následků lze rozdělit na náklady provozovatele dopravního objektu a vícenáklady účastníků silničního provozu. Vlastní náklady provozovatele při poruše dopravního objektu jsou náklady na samotnou obnovu poškozeného objektu a případně náklady vyplývající z vlivu na zdraví a bezpečnost, pokud je prokázána vina provozovatele. Kumulované vícenáklady účastníků silničního provozu pak přímo souvisí s délkou případné objížděky, hustotou dopravy a dobou do obnovy daného objektu. Časová ztráta bude částečně zakomponována do délky objížděky, což je podrobněji popsáno níže.

Struktura uvedených faktorů je znázorněna na obr. 32.

¹² Náklady třetí strany, které mohou nastat například při přepravě nebezpečných látek, nejsou vědomě do hodnocení zahrnuty. Těmito následky se detailně zabývají jiné studie a není vhodné je do semikvantitativního hodnocení zahrnovat z důvodu obtížného určení jejich intenzity i konkrétních následků.



Obr. 32: Struktura faktorů podílejících se na výsledném riziku

3.8.2 Hodnotící stupnice

Navržení hodnotících stupnic pro hodnocené faktory není v první řadě nutné podřizovat výpočtu rizika/rizikového čísla. Při hodnocení většího počtu faktorů než je běžné u postupů doporučených normami, by ani při přizpůsobení stupnic výpočtu, nebyl výpočet ve většině situací dán prostým součtem nebo součinem bodových ohodnocení. Stupnice je důležité především přizpůsobit rozsahu hodnot, které může ukazatel nabývat, obecným zvyklostem (časová stupnice s hodnotami den, týden, měsíc atd., namísto 1 h, 10 h, 100 h atd.) a předpokládanému pravděpodobnostnímu rozložení hodnot v daném rozsahu.



Všechny navržené stupnice jsou pětibodové¹³. Pro samotnou analýzu a její vyhodnocení není nutné, aby všechny používané stupnice měly stejný počet úrovní, je to však vhodné z pohledu hodnotitele.

Intenzita výskytu události

- Označení faktoru (ukazatele): F_1
- Počet úrovní stupnice: 5
- Označení bodového ohodnocení: x_1
- Označení zástupné hodnoty: y_1
- Označení aproximující funkce: f_1
- Jednotka: $[h^{-1}]$

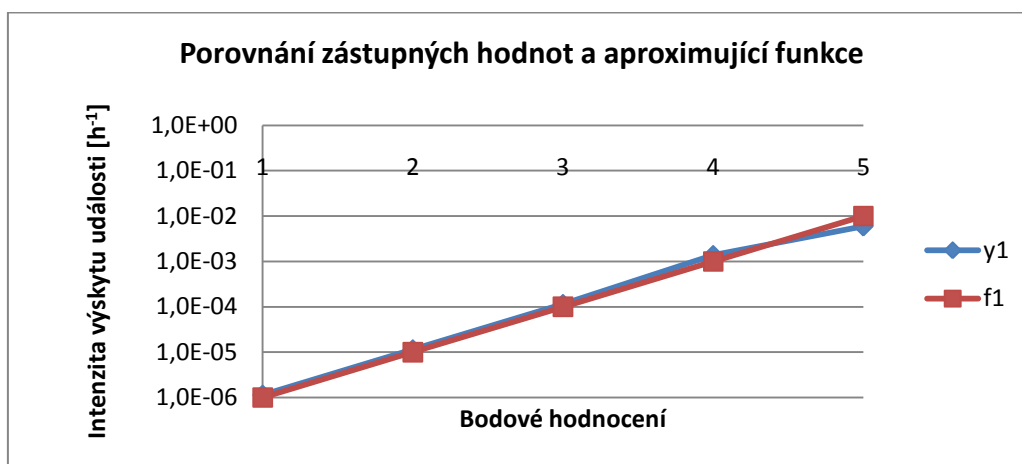
Časové údaje v popisu jsou voleny na základě běžně používaných časových údajů, rozsah je pak volen s ohledem na možnou intenzitu analyzovaných událostí. Stupnice přibližně odpovídá geometrické posloupnosti s předpisem aproximující funkce f_1 .

Tab. 20: Zástupné hodnoty a aproximující funkce faktoru Intenzita výskytu události

x_1	Intenzita výskytu události	$y_1[h^{-1}]$	$f_1[h^{-1}]$
1	zanedbatelná (cca 1x za 100 let a méně)	1,1E-06	$f_1 = 10^{x_1-7}$
2	malá (cca 1x za 10 let)	1,1E-05	
3	střední (cca 1x za rok)	1,1E-04	
4	vysoká (cca 1x za měsíc)	1,4E-03	
5	extrémní (cca 1x za týden a častěji)	6,0E-03	

¹³ **Více než sedmiúrovňová stupnice je příliš:** Studie ukazují, že lidé se nedokáží pevně rozhodnout při hodnotící stupnici s více než sedmi úrovněmi. Zvolte tedy sedm úrovní nebo méně. Kolik je tedy ideální? Studie nedávají definitivní odpověď, často jsou zmiňovány pěti, čtyři a tříúrovňové stupnice.

Výhradně číselné stupnice jsou pro hodnocení obtížnější: Doporučuje se ke každé číselné úrovni dopsat slovní popis dané úrovně. Se stupnicemi, kdy je pouze známo, který stupeň je nejlepší/nejhorší, je dosahováno výsledků méně přesných. [19]



Obr. 33: Porovnání zástupných hodnot a aproximující funkce (Intenzita výskytu události)

Náklady na obnovu objektu

- Označení faktoru (ukazatele): F_2
- Počet úrovní stupnice: 5
- Označení bodového ohodnocení: x_2
- Označení zástupné hodnoty: y_2
- Označení aproximující funkce: f_2
- Jednotka: [Kč]

Hodnoty odpovídají geometrické posloupnosti s kvocientem 10. S takto vysokým kvocientem je možné hodnotit diametrálně nákladově odlišné události, například náledí vs. rekonstrukce úseku.

Tab. 21: Zástupné hodnoty a aproximující funkce faktoru Náklady na obnovu objektu

x_2	Náklady na obnovu objektu	y_2 [Kč]	f_2 [Kč]
1	zanedbatelné (cca 1 000 Kč a méně)	1,00E+03	$f_2=10^{x_2+2}$
2	malé (cca 10 000 Kč)	1,00E+04	
3	střední (cca 100 000 Kč)	1,00E+05	
4	vysoké (cca 1 000 000 Kč)	1,00E+06	
5	extrémní (cca 10 000 000 Kč a více)	1,00E+07	

Porovnání zástupných hodnot a hodnot z aproximující funkce není nutné, hodnoty se pro všechna bodová hodnocení shodují.

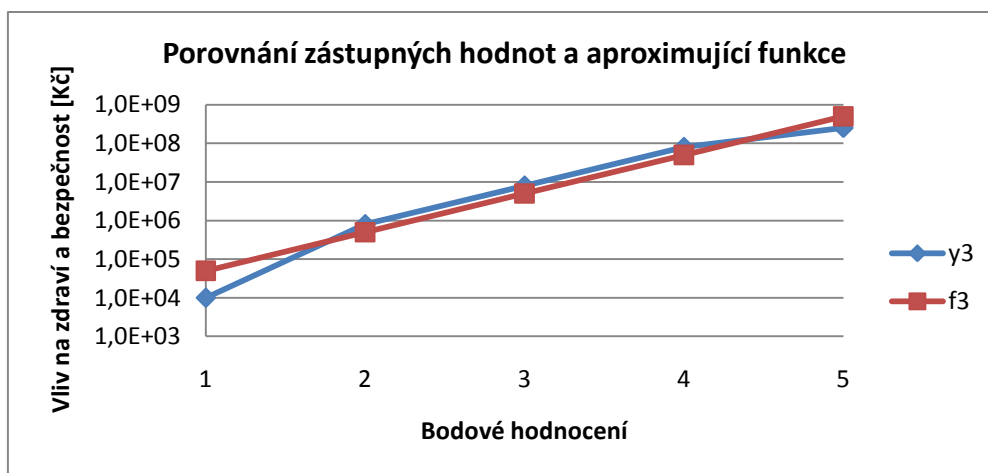
Náklady plynoucí z vlivu na zdraví a bezpečnost

- Označení faktoru (ukazatele): F_3
- Počet úrovní stupnice: 5
- Označení bodového ohodnocení: x_3
- Označení zástupné hodnoty: y_3
- Označení aproximující funkce: f_3
- Jednotka: [Kč]

Aby bylo možné do celkového rizika nežádoucí události zahrnout i vliv na zdraví, je nutné ho finančně ocenit. Finanční ohodnocení zdraví či života člověka je velmi diskutabilní a v různých studiích se zásadním způsobem liší. Určení vhodných hodnot pro zastoupení jednotlivých úrovní není podstatou této práce, a proto byly bez hlubší analýzy přejaty z ocenění lidského zdraví ze softwaru RRM (Risk and Reliability Management) společnosti Shell.

Tab. 22: Zástupné hodnoty a aproximující funkce faktoru Náklady plynoucí z vlivu na zdraví a bezpečnost

x_3	Náklady plynoucí z vlivu na zdraví a bezpečnost	y_3 [Kč]	f_3 [Kč]
1	zanedbatelný (poškození zdraví bez trvalého následku)	1,0E+04	$f_3 = 5 \cdot 10^{x_3+3}$
2	malý (poškození zdraví s trvalými následky)	8,0E+05	
3	střední (poškození zdraví s trvalými následky více osob)	8,0E+06	
4	vysoký (úmrtí osoby)	8,0E+07	
5	extrémní (úmrtí více osob)	2,5E+08	



Obr. 34: Porovnání zástupných hodnot a aproximující funkce (Náklady plynoucí z vlivu na zdraví a bezpečnost)

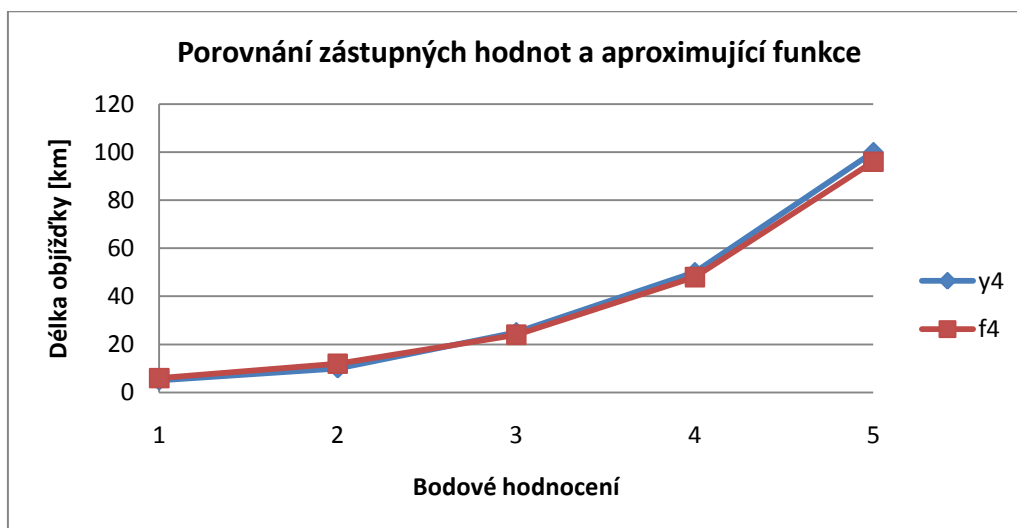


Délka objížděky

- Označení faktoru (ukazatele): F_4
- Počet úrovní stupnice: 5
- Označení bodového ohodnocení: x_4
- Označení zástupné hodnoty: y_4
- Označení aproximující funkce: f_4
- Jednotka: [km]

Tab. 23: Zástupné hodnoty a aproximující funkce faktoru Délka objížděky

x_4	Délka objížděky	y_4 [km]	f_4 [km]
1	zanedbatelná (cca 5 km a méně)	5	$f_4 = 3 \cdot 2^{x_4}$
2	malá (cca 10 km)	10	
3	střední (cca 25 km)	25	
4	velká (cca 50 km)	50	
5	extrémní (cca 100 km a více)	100	



Obr. 35: Porovnání zástupných hodnot a aproximující funkce (Délka objížděky)

Intenzita dopravy

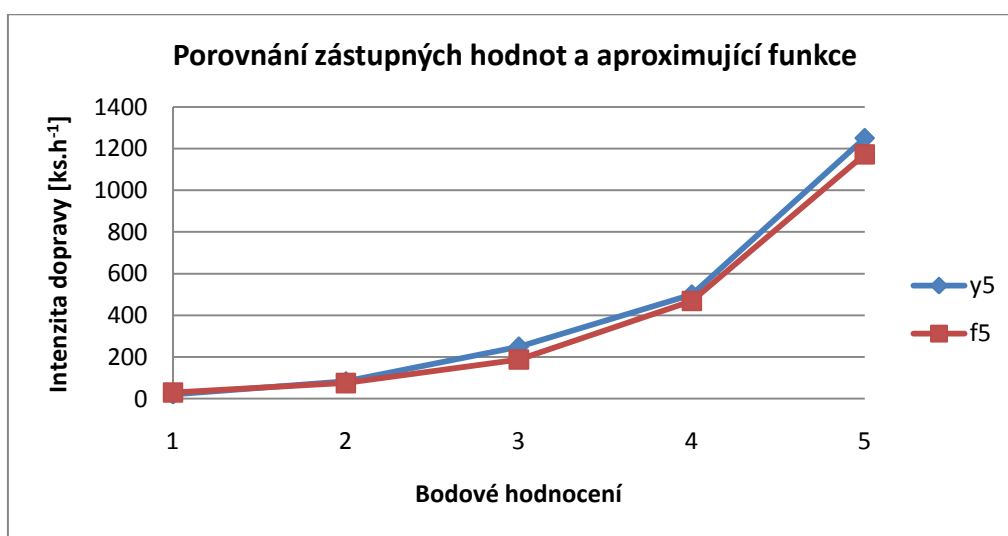
- Označení faktoru (ukazatele): F_5
- Počet úrovní stupnice: 5
- Označení bodového ohodnocení: x_5
- Označení zástupné hodnoty: y_5
- Označení aproximující funkce: f_5
- Jednotka: [h^{-1}]

Níže navržená hodnotící stupnice vychází ze statistik intenzit dopravy pravidelně prováděných Ředitelstvím silnic a dálnic ČR [20]. Jedná se o celoroční průměr vozidel za 24 h na dálnicích a silnicích 1. třídy. Při známých přesných hodnotách intenzity dopravy

hodnocených úseků je vhodné se od semikvantitativního hodnocení tohoto faktoru oprostít a použít přímo statisticky zjištěné intenzity, viz postup popsany v 3.8.4.

Tab. 24: Zástupné hodnoty a aproximující funkce faktoru Intenzita dopravy

x_5	Intenzita dopravy	$y_5[h^{-1}]$	$f_5[h^{-1}]$
1	zanedbatelná (cca 500 ks/24h a méně)	21	$f_5 = 30 \cdot 2,5^{x_5-1}$
2	malá (cca 2 000 ks/24h)	83	
3	střední (cca 6 000 ks/24h)	250	
4	velká (cca 12 000 ks/24h)	500	
5	extrémní (cca 30 000 ks/24h a více)	1250	



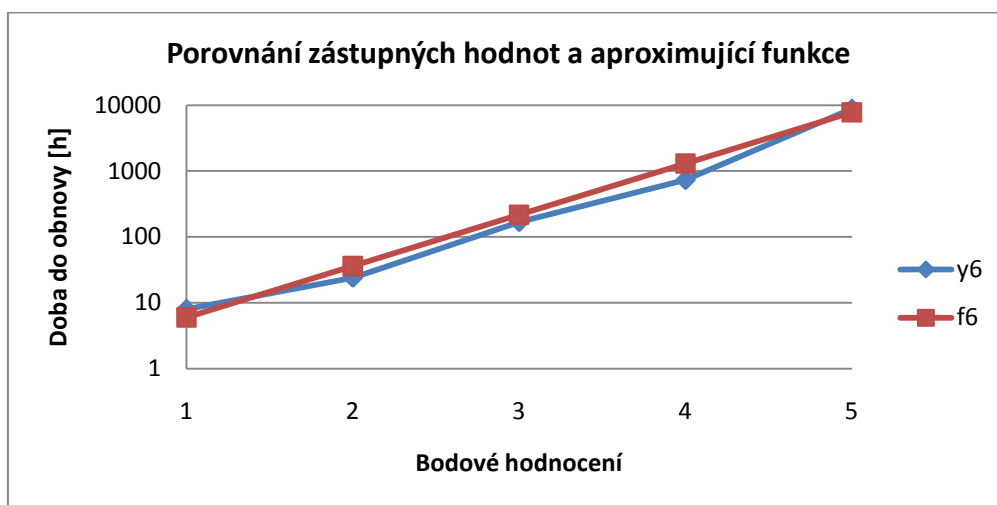
Obr. 36: Porovnání zástupných hodnot a aproximující funkce (Intenzita dopravy)

Doba do obnovy

- Označení faktoru (ukazatele): F_6
- Počet úrovní stupnice: 5
- Označení bodového ohodnocení: x_6
- Označení zástupné hodnoty: y_6
- Označení aproximující funkce: f_6
- Jednotka: [h]

Tab. 25: Zástupné hodnoty a aproximující funkce faktoru Doba do obnovy

x_6	MTTR - doba do obnovy	$y_6[h]$	$f_6[h]$
1	zanedbatelná (cca 8 hodin a méně)	8	$f_6 = 6^{x_6}$
2	malá (cca 1 den)	24	
3	střední (cca 1 týden)	168	
4	velká (cca 1 měsíc)	730	
5	extrémní (cca 1 rok a více)	8760	



Obr. 37: Porovnání zástupných hodnot a aproximující funkce (Doba do obnovy)

3.8.3 Výpočet výsledného rizikového čísla/rizika

Díky navržení hodnotících stupnic včetně zástupných hodnot či aproximujících funkcí je nyní možné vytvořit výslednou funkci pro výpočet výsledného rizika pocházející z hodnocené nežádoucí události. Riziko je dáno součinem intenzity výskytu události a celkových následků vyjádřených ve finančním ohodnocení. Součinem zástupných hodnot faktorů F_4 , F_5 a F_6 získáme kumulovanou vzdálenost objížděky všech dopravních prostředků během celkové doby obnovy.

$$\text{Kumulovaná vzdálenost objížděky během doby obnovy: } y_4 \cdot y_5 \cdot y_6$$

$$[\text{km} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{h}] = [\text{km}]$$

Pro získání finančního vyjádření je tedy ještě nutné zjistit průměrné náklady na 1 km, které označíme k . Pro výpočet k použijeme následující vstupy:

- Poměrné zastoupení osobní dopravy: $p = 0,65^{14}$
- Sazba na 1 km nákladní dopravy a komerční přepravy osob: $n_n = 35 \text{ Kč} \cdot \text{km}^{-1}$
- Sazba na 1 km osobní dopravy: $n_o = 6,1 \text{ Kč} \cdot \text{km}^{-1}$

¹⁴ Statistika intenzity dopravy zveřejněná na internetových stránkách Ředitelství silnic a dálnic (www.rsd.cz).



Sazba na 1 km nákladní dopravy je průměrnou hodnotou vybraných internetových nabídek¹⁵, tato sazba již zahrnuje mzdové a další náklady spojené s přepravou. Do osobní dopravy jsou započítány pouze náklady na samotný provoz dopravního prostředku (osobního automobilu) a vychází z výše amortizace na 1 km a průměrné spotřeby pohonných hmot¹⁶.

Průměrné náklady na 1 km k jsou tedy vypočteny vztahem:

$$k = p \cdot n_o + (1 - p) \cdot n_n \quad (20)$$

Po dosazení:

$$k = 0,65 \cdot 6,1 + (1 - 0,65) \cdot 35 \cong 16,2 \text{ Kč} \cdot \text{km}^{-1} \quad (21)$$

Výsledné riziko je pak dáno následujícím vztahem.

$$R = y_1 \cdot (y_2 + y_3 + k \cdot y_4 \cdot y_5 \cdot y_6) \quad (22)$$
$$[\text{h}^{-1} \cdot (\text{Kč} + \text{Kč} + \text{Kč} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{h})] = [\text{Kč} \cdot \text{h}^{-1}]$$

Hodnoty y_1 až y_6 jsou zástupnými hodnotami bodových ohodnocení, v případě potřeby výpočtu rizika jako funkce bodových ohodnocení lze riziko přibližně vypočítat pomocí aproximujících funkcí f_1 až f_6 , tedy:

$$R \cong f_1 \cdot (f_2 + f_3 + k \cdot f_4 \cdot f_5 \cdot f_6) \quad (23)$$
$$[\text{h}^{-1} \cdot (\text{Kč} + \text{Kč} + \text{Kč} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{km} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{h})] = [\text{Kč} \cdot \text{h}^{-1}]$$

Po dosazení konkrétních funkcí z 3.8.2 a koeficientu k dostáváme:

$$R \cong 10^{x_1-7} \cdot (10^{x_2+2} + 5 \cdot 10^{x_3+3} + k \cdot 3 \cdot 2^{x_4} \cdot 500 \cdot 2,5^{x_5-1} \cdot 6^{x_6})$$
$$R \cong 10^{x_1-7} \cdot (10^{x_2+2} + 5 \cdot 10^{x_3+3} + 24300 \cdot 2^{x_4} \cdot 2,5^{x_5-1} \cdot 6^{x_6}) \quad (24)$$

¹⁵ <http://www.superdoprava.cz/katalog/nakladni-doprava/>

¹⁶ Náhrada na amortizaci osobního automobilu pro rok 2009 je 3,90 Kč/km. Průměrná spotřeba dle serveru <http://www.spritmonitor.de/en/> ke dni 15. 10. 2009 činí 7,9 l/100km. Průměrná cena litru pohonných hmot ke dni 15. 10. 2009 dle serveru <http://www.ceskybenzin.cz/> činí 27,60 Kč, vzhledem k zanedbatelným rozdílům mezi cenou nafty a benzinu byl poměr aut s naftovým a benzínovým pohonem zanedbán.



Pokud se na daném objektu dopravní infrastruktury hodnotí více nežádoucích událostí, je výsledné riziko dáno součtem všech dílčích rizik jednotlivých typů událostí.

$$R = \sum R_i \quad (25)$$

První možností je přiřazením rizika R nežádoucí události výpočet ukončit. V případě potřeby je však možné výsledné riziko zpětně transformovat do vhodně zvolené bodové stupnice. To je výhodné především pro barevné zobrazení v mapě nebo pro snadné porovnání hodnocených událostí srovnáním dvou celých čísel daného rozsahu.

Každý bodový stupeň bude reprezentován intervalem hodnot rizika, přičemž hodnoty mezi intervalů budou dány vhodnou posloupností tak, aby byly při hodnocení využitelné všechny bodové stupně.

Prvním krokem pro volbu intervalu je určení minimálního a maximálního rizika, která jsou ze vztahu (22) dána:

$$R_{min} = R(1, 1, 1, 1, 1, 1) \quad (26)$$

$$R_{max} = R(5, 5, 5, 5, 5, 5) \quad (27)$$

Při stanovení mezních hodnot intervalů jako hodnot geometrické posloupnosti nebudou nejvyšší bodová ohodnocení téměř využita. Budeme předpokládat, že riziko nežádoucích událostí, které budou v praxi hodnoceny, nebude v naprosté většině případů vyšší než $R(4, 4, 4, 4, 4, 4) \cong 5,27 \cdot 10^5 \text{ Kč} \cdot \text{h}^{-1}$. Úseky s rizikem nad tuto hodnotu by vzhledem k riziku, které odpovídá průměrným hodinovým nákladům, nemohly být dlouhodobě provozovány. Nežádoucí události s vysokou intenzitou výskytu mají zpravidla malé následky a naopak nežádoucí události se závažnými následky se vyskytují zřídka.

Pro desetistupňovou hodnotící škálu tedy dostáváme hraniční hodnoty intervalů jako geometrickou posloupnost danou parametry $a_0 = R_{min}$; $q = \sqrt[10]{\frac{R(4, 4, 4, 4, 4, 4)}{R_{min}}} \cong 5$.

Tab. 26: Převod rizika R na rizikové číslo RN

RN	$R [K\check{c} \cdot h^{-1}]$	
	od	do
1	2,7E-02	1,4E-01
2	1,4E-01	6,8E-01
3	6,8E-01	3,4E+00
4	3,4E+00	1,7E+01
5	1,7E+01	8,4E+01
6	8,4E+01	4,2E+02
7	4,2E+02	2,1E+03
8	2,1E+03	1,1E+04
9	1,1E+04	5,3E+04
10	5,3E+04	-

Vztah pro automatický přepočít rizika na rizikové číslo je pak:

$$RN = \left\lfloor \frac{\log \frac{R}{R_{min}}}{\log q} \right\rfloor + 1 = \left\lfloor \frac{\log \frac{R}{2,71 \cdot 10^{-2}}}{\log 5} \right\rfloor + 1, \quad (28)$$

kde $\lfloor x \rfloor$ je dolní celá část x .

3.8.4 Kombinace semikvantitativních a kvantitativních vstupů

Při analýzách bezporuchovosti a rizika je vždy dosahováno věrohodnějších výsledků při statisticky zjištěných vstupních datech než při expertních odhadech. Proto je kontraproduktivní nahrazovat kvalitní vstupy bodovým hodnocením a vnášet tak do analýzy další nepřesnost. Navržený postup hodnocení a výpočtu výsledného rizika umožňuje u libovolných faktorů, pro které jsou statistická data k dispozici, použít tato data místo zástupných hodnot jednotlivých bodových ohodnocení.

U hodnocení rizika objektů dopravní infrastruktury se kvantitativní vstupy předpokládají především u faktoru Intenzita dopravy a u některých typů nežádoucích událostí například i Intenzita výskytu události. Na komunikacích vyšších tříd, tedy na dálnicích, rychlostních komunikacích a silnicích I. třídy jsou dále dostupná data o Intenzitě dopravy. Tato data pravidelně shromažďuje a vyhodnocuje Ředitelství silnic a dálnic ČR [20].



3.8.5 Typy dílčího vyhodnocení

V některých případech je výhodné vyhodnotit riziko pouze dílčím způsobem. První možností je porovnávat objekty pouze dle rizika plynoucího z jednoho konkrétního typu nežádoucí události. Díky tomu lze určit objekty, které jsou například kritické z pohledu dopravních nehod atd.

Druhou možností je vyhodnotit pouze rizika plynoucí z žádaných typů následků, tedy dle rizika plynoucího z obnovy objektu, nákladů způsobených objížděnkou, nebo dle rizika úrazu či smrti. To je možné například použitím tzv. vah jednotlivých faktorů.

Váhy faktorů

S přiřazením vah jednotlivým faktorům se setkáváme především u vícekritériálních analýz, kde je výpočet výsledného kritéria dán především intuitivně. Má za úkol hodnocený faktor zvýraznit nebo potlačit. Toto není zapotřebí, pokud je výpočet rizikového čísla systematicky navržen dle hodnotících stupnic a vazeb mezi hodnocenými faktory. Je tedy rozumné váhování faktorů použít pouze v případech, kdy chceme hodnocené události porovnávat pouze v dílčích oblastech – např. riziko pocházející z vlivu na zdraví, riziko pocházející z vlivu na životní prostředí apod. Tím se omezíme na dvě různé hodnoty vah:

$v_i = 0$ pokud faktor(y) do výpočtu nechceme zahrnout,

$v_i = 1$ pokud faktor(y) do výpočtu chceme zahrnout.

Pro možnost dílčího vyhodnocení dat upravíme vztah pro výpočet rizika následujícím způsobem:

$$R = y_1^{v_1} \cdot (v_2 \cdot y_2 + v_3 \cdot y_3 + v_4 \cdot k \cdot y_4 \cdot y_5 \cdot y_6) \quad (29)$$

Tab. 27: Hodnoty vah pro dílčí vyhodnocení dat

Dílčí vyhodnocení dat	v_1	v_2	v_3	v_4
Riziko z obnovy objektů	1	1	0	0
Riziko z vlivu na zdraví	1	0	1	0
Riziko z vícenákladů na objížděku	1	0	0	1
Deterministické určení celkových následků	0	1	1	1

3.8.6 Příklad hodnocení objektů

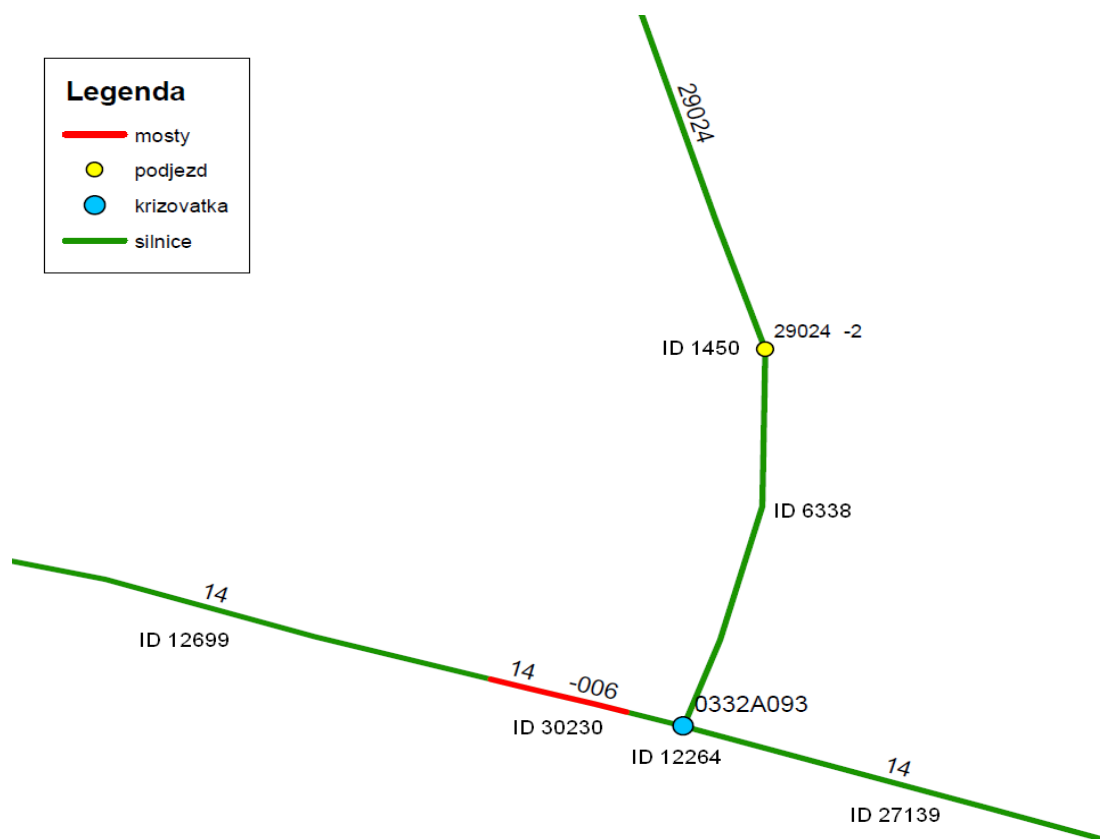
Pro demonstrování výše navržených postupů bylo vybráno 6 sousedících objektů silniční dopravy v Jablonci nad Nisou ve směru na Liberec. Oblast byla zvolena podle

dostupnosti GIS dat a dále tak, aby se v těsné blízkosti vyskytovaly objekty různých typů. Kromě liniových úseků silnice (konkrétně silnic 1. a 3. třídy) jsou v hodnocení objekty typu most, křižovatka a podjezd. Seznam vybraných objektů je včetně dalších parametrů uveden v tab. 28.

Tab. 28: Vybrané objekty hodnocení

Č. o.	Typ	ID	Kód	Silnice 1	Silnice 2	Typ Silnice 1
1	Silnice	12699		14		silnice 1. třídy
2	Most	30230	14 - 006	14		silnice 1. třídy
3	Křižovatka	12264	0332A093	14	29024	silnice 1. třídy
4	Silnice	6338		29024		silnice 3. třídy
5	Podjezd	1450	29024 - 2	29024		silnice 3. třídy
6	Silnice	27139		14		silnice 1. třídy

Schematické zobrazení objektů s přidáním ID je znázorněno na obr. 38. Pro konkrétní lokalizaci dané oblasti v mapě lze použít GPS souřadnice N 50°43'42'', E 15°9'13'' (GPS souřadnice křižovatky označenou ID 12264).



Obr. 38: Mapa hodnocených objektů



Na vybraných objektech byly specifikovány možné nežádoucí události, následně byly tyto nežádoucí události bodově ohodnoceny pomocí šesti faktorů, které jsou detailně popsány v kapitole 3.8.2.

Tab. 29: Určení možných nežádoucích událostí a jejich bodové ohodnocení

Č. o.	Typ	Nežádoucí událost	F1	F2	F3	F4	F5	F6
1	Silnice	Dopravní nehoda	3	1	1	1	4	1
2	Most	Dopravní nehoda	2	2	1	1	4	1
		Destrukce nadzemních částí staveb	1	4	2	1	4	4
3	Křižovatka	Dopravní nehoda	4	1	1	1	4	1
4	Silnice	Dopravní nehoda	3	1	1	1	3	1
		Sesuv půdy	1	4	3	1	3	4
5	Podjezd	Dopravní nehoda	2	3	1	1	3	1
		Havárie potrubí	2	3	2	1	3	3
6	Silnice	Dopravní nehoda	3	2	1	1	4	1

Zástupné hodnoty bodových ohodnocení, nezbytné pro výpočet rizika a případně i rizikového čísla, obsahuje tabulka tab. 30. Převodní tabulky mezi bodovými ohodnoceními a zástupnými hodnotami jsou obsaženy v kapitole 3.8.2.

Tab. 30: Zástupné hodnoty bodových ohodnocení

Č. o.	Typ	Nežádoucí událost	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
1	Silnice	Dopravní nehoda	1,1E-04	1,0E+03	1,0E+04	5	500	8
2	Most	Dopravní nehoda	1,1E-05	1,0E+04	1,0E+04	5	500	8
		Destrukce nadzemních částí staveb	1,1E-06	1,0E+06	8,0E+05	5	500	730
3	Křižovatka	Dopravní nehoda	1,4E-03	1,0E+03	1,0E+04	5	500	8
4	Silnice	Dopravní nehoda	1,1E-04	1,0E+03	1,0E+04	5	250	8
		Sesuv půdy	1,1E-06	1,0E+06	8,0E+06	5	250	730
5	Podjezd	Dopravní nehoda	1,1E-05	1,0E+05	1,0E+04	5	250	8
		Havárie potrubí	1,1E-05	1,0E+05	8,0E+05	5	250	168
6	Silnice	Dopravní nehoda	1,1E-04	1,0E+04	1,0E+04	5	500	8

Výpočet samotného rizika je podle vztahu (22), zpětný převod rizika na rizikové číslo je pak dle tab. 26. V šestém sloupci jsou dále vyčísleny následky nežádoucí události dle vztahu (29) s využitím vah uvedených v tab. 27. Pro porovnání jsou uvedena i pořadí nežádoucích událostí dle rizika, rizikového čísla a následků.



Tab. 31: Vyhodnocení nežádoucích událostí na daných objektech

Č. o.	Typ	Nežádoucí událost	R [Kč. h ⁻¹]	RN	N [Kč]	Pořadí dle R	Pořadí dle RN	Pořadí dle N
1	Silnice	Dopravní nehoda	36,9	5	3,4E+05	6.	3-8.	3-6.
2	Most	Dopravní nehoda	3,8	4	3,4E+05	2.	2.	3-6.
		Destrukce nadzemních částí staveb	34,5	5	3,1E+07	5.	3-8.	9.
3	Křižovatka	Dopravní nehoda	469,0	7	3,4E+05	9.	9.	3-6.
4	Silnice	Dopravní nehoda	19,0	5	1,7E+05	3.	3-8.	1.
		Sesuv půdy	26,2	5	2,4E+07	4.	3-8.	8.
5	Podjezd	Dopravní nehoda	3,0	3	2,7E+05	1.	1.	2.
		Havárie potrubí	47,3	5	4,3E+06	8.	3-8.	7.
6	Silnice	Dopravní nehoda	37,8	5	3,4E+05	7.	3-8.	3-6.

Metodika předpokládá plošné hodnocení objektů silniční infrastruktury v rámci České republiky, přičemž v první etapě budou hodnoceny objekty související s rychlostními komunikacemi a silnicemi 1. třídy.

Z tohoto důvodu není možné po hodnocení šesti objektů vyvozovat konkrétní závěry, sestavovat krizové plány či hledat nápravná opatření. Náplň této kapitoly slouží především pro znázornění postupů analýzy na reálných objektech.



4. Začlenění metody FMECA do struktury norem

Metoda FMECA patří ve struktuře norem k analýzám bezporuchovosti společně s těmito metodami:

- metoda blokových diagramů bezporuchovosti (RBD),
- metoda výpočtu bezporuchovosti z dílů (PC),
- analýza stromem poruchových stavů FTA,
- Markovova analýza (MA).

Po definování poruchového stavu (nežádoucí události) je metodami RBD, PC, FTA a MA zjištěna buď hodnota bezporuchovosti/nepohotovosti, případně lze tyto ukazatele při kvalitativní analýze nepřímo vyjádřit například pomocí minimálních kritických řezů.

Postupy FMECA jsou však jednoznačně analýzou rizika, a to ať se jedná o hodnocení pomocí rizikových čísel *RPN* nebo pomocí matice rizika.

Snadným východiskem je začlenění všech výše uvedených metod do nové kategorie „Techniky analýzy bezporuchovosti a rizika“.

5. Závěr

Metoda FMECA je rozšířením metody FMEA o hodnocení poruchového stavu pomocí rizikového čísla *RPN* nebo pomocí matice kritičnosti/rizika. Díky tomu, že pro hodnocení se lze omezit na expertní odhady a navíc není k provedení analýzy nezbytné zakoupení specializovaného komerčního softwaru, stala se oblíbenou analýzou spolehlivosti a rizika v průmyslovém prostředí.

Disertační práce se zaměřila na posouzení stávajících postupů popsaných v normách, a to především v mezinárodním standardu IEC a oborovém standardu VDA, a návrh nových či modifikovaných postupů na základě předchozí analýzy. Základním nedostatkem FMECA je stávající způsob výpočtu rizikového čísla *RPN*. Z provedené analýzy v kapitole 3.3 je zřejmé, že výpočet *RPN* není dle stávajících postupů korektní, a to především z důvodu, že závislost rizika, které by bylo počítáno z provozních dat bez využití bodových stupnic, na hodnotě *RPN* není rostoucí funkcí. Pořadí hodnocených způsobů poruch (nežádoucích událostí) dle *RPN* tak nemusí korespondovat s pořadím dle kvantitativně vypočteného rizika. V kapitole 3.4 jsou navrženy obecně platné postupy pro libovolné hodnotící stupnice, které díky tomu mohou být modifikovány na základě specifických vlastností hodnocených objektů a požadavků analytika. Obdobná analýza byla provedena i u hodnocení pomocí matice kritičnosti/rizika.

Dílčím způsobem je v této práci modifikován i postup zjištění vazeb mezi komponentami systému (kapitola 2 - část Postup provádění analýzy). Modifikace spočívá v provedení konstrukčního i funkčního rozpadu systému před samotným prováděním analýzy. Konstrukční rozpad slouží ke zjištění množiny všech komponent v systému včetně jejich počtu, funkční rozpad je pak v samotné analýze využit pro specifikaci následků na vyšší úrovni funkčního členění systému.

Principy semikvantitativní analýzy FMECA jsou využitelné v širším kontextu, než jak je podává norma nebo jak jsou využívány v průmyslovém prostředí. Jejím zobecněním tak lze hodnotit libovolný počet faktorů a též jiné typy, než na které jsme v klasické FMECA zvyklí. Tyto postupy jsou v disertační práci podrobně vysvětleny a prezentovány na příkladech (kapitola 3.7 a 3.8), které se týkají brzdové destičky osobního automobilu a hodnocení kritičnosti dopravní infrastruktury, které pracuje s 6 různými faktory. Obdobným způsobem lze semikvantitativní hodnocení aplikovat do celé řady různorodých oblastí.



Literatura

- [1] ČSN EN 60812 (01 0675) Techniky analýzy bezporuchovosti systémů - Postup analýzy způsobů a důsledků poruch (FMEA)
- [2] MIL-STD-1629a: Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis
- [3] ČSN EN 60050-191 Mezinárodní elektrotechnický slovník – Kapitola 191: Spolehlivost a jakost služby
- [4] ARVANITOYANNIS, Ioannis S.; VARZAKAS, Theodoros H. A conjoint study of quantitative and semi-quantitative assessment of failure in a strudel manufacturing plant by means of FMEA and HACCP, Cause and Effect and Pareto diagram. *International Journal of Food Science & Technology*, Oct 2007. Volume 42, Issue 10, Page 1156-1176. ISSN 1365-2621
- [5] ARVANITOYANNIS, Ioannis S.; VARZAKAS, Theodoros H. Application of failure mode and effect analysis (FMEA), cause and effect analysis and Pareto diagram in conjunction with HACCP to a potato chips manufacturing plant. *International Journal of Food Science & Technology*, Dec 2007. Volume 42, Issue 12, Page 1424-1442. ISSN 1365-262
- [6] PILLAY, Anand; WANG, Jin. Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. *Reliability Engineering & System Safety*, Jan2003. Vol. 79 Issue 1, p69, 17p. ISSN 0951-8320
- [7] SHAHIN Arash. Integration of FMEA and the Kano model: An exploratory examination. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2004. Volume 21, Issue 7, Page 731 – 746. ISSN 0265-671X
- [8] BEN-DAYA, M.; RAOUF, Abdul. A revised failure mode and effects analysis model. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 1996. Volume 13, Issue 1, Page 43 – 47. ISSN: 0265-671X
- [9] BRAGLIA Marcello. MAFMA: multi-attribute failure mode analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2000. Volume 17, Issue 9, Page 1017 – 1033. ISSN 0265-671X
- [10] SANKAR, Nune Ravi; PRABHU, Bantwal S. Modified approach for prioritization of failures in a system failure mode and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2001. Volume 18, Issue 3, Page 324 – 336. ISSN 0265-671X
- [11] BECKER, J.C.; FLICK, G. A practical approach to failure mode, effects and criticality analysis (FMECA) for computing systems. In *High-Assurance Systems Engineering Workshop (HASE '96)*. 1st edition. [s.l.]: [s.n.], 1996. s. 228
- [12] BEVILACQUA, M.; BRAGLIA, M.; GABBRIELLI, R. Monte Carlo simulation approach for a modified FMECA in a power plant. *Quality and reliability engineering international*. July-August 2000, vol. 16, no. 4., s. 313-324. ISSN 0748-8017



- [13] BOWLES, J.B. An assessment of RPN prioritization in a failure modes effects and criticality analysis. *Annual Reliability and Maintainability Symposium, proceedings*. 2003, s. 380-386. ISSN 0149-144X
- [14] SEYED-HOSSEINI, S.M.; SAFAEI, N.; ASGHARPOUR, M.J. Reprioritization of failures in a system failure mode and effects analysis by decision making trial and evaluation laboratory technique. *Reliability Engineering & System Safety*. August 2006, vol. 91, no. 8, s. 872-881. ISSN 0951-8320
- [15] CHEN, Jih Kuang. *Utility Priority Number Evaluation for FMEA*. Journal of Failure Analysis and Prevention. September 2007, vol. 7, no. 5, s. 321-328. ISSN 1547-7029 (Print) 1864-1245 (Online)
- [16] TAY, Kai Meng; LIM, Chee Peng. *Applied Soft Computing Technologies: The Challenge of Complexity*. Berlin : Springer, 2006, s. 161-171. Application of Fuzzy Inference Techniques to FMEA. ISBN 978-3-540-31649-7.
- [17] FUCHS, Pavel, *Využití spolehlivosti v provozní praxi*, skriptum, Liberec 2002
- [18] IRESON, W. Grant, COOMBS, Clyde F., MOOS, Richard Y. *Handbook of Reliability Engineering and Management*. 2nd edition. 1995. 620 s. ISBN 0-07-012750-6.
- [19] WORDPRESS: Likertovy stupnice – pokyny [online] [cit. 2009-07-22], URL: <http://intelligentmeasurement.wordpress.com/2007/11/20/likert-scale-surveys-best-practices/>
- [20] ŘEDITELSTVÍ SILNIC A DÁLNIC: Intenzity dopravy na dálnicích a silnicích 1. třídy [online] [cit. 2009-08-04], URL: <http://www.rsd.cz/Silnicni-a-dalnicni-sit/Intenzita-dopravy>

Vybrané publikace autora

- [21] KAMENICKÝ, Jan; **ZAJÍČEK, Jaroslav**: *Specification of Probability of an Aircraft Disaster in a Selected Location of The Czech republic*, Reliability, Safety and Diagnostics of Transport Structures and means 2005, Pardubice 7.-8.7.2005, ISBN 80-7194-769-5
- [22] FUCHS, Pavel; **ZAJÍČEK, Jaroslav**: *Zranitelnost dopravní infrastruktury z pohledu analýzy rizik*, Nové výzvy pro dopravu a spoje, Pardubice, 2006, ISBN 80-7194-888-2
- [23] KAMENICKÝ, Jan; **ZAJÍČEK, Jaroslav**: *Effectiveness optimization of RCM process in Risk*, Reliability and Social Safety, Stavanger, 25.-27.6.2007, ISBN 978-0-415-44786-7
- [24] **ZAJÍČEK, Jaroslav**: *Aplikace FMECA při hodnocení rizika dopravní infrastruktury*, Sborník z 28. semináře Odborné skupiny pro spolehlivost České společnosti pro jakost „Spolehlivost tradiční i netradiční“, Praha, 2007, ISBN 978-80-02-01965-7
- [25] FUCHS, Pavel; **ZAJÍČEK, Jaroslav**: *Profitability assessment of outsourcing maintenance from the producer (big rotary machine study)*, Safety, Reliability and Risk Analysis, Valencia, 2008, ISBN 978-0-415-48513-5
- [26] **ZAJÍČEK, Jaroslav**: *Alternativní postup výpočtu rizikového čísla v analýzách FMECA*, Národné fórum údržby 2008, Žilina, 2008, ISBN 978-80-8070-851-1



- [27] KAMENICKÝ, Jan; **ZAJÍČEK, Jaroslav**: *Typová údržba zařízení na základě vyhodnocení analýz RCM, Údržba 2008/Maintenance 2008*, Liblice, 2008, ISBN 978-80-254-2500-8
- [28] DOLEŽAL, Radim; **ZAJÍČEK, Jaroslav**: *Nepřesnosti a jejich důsledky v analýzách RCM*, Středoevropské fórum údržby 2009, Liblice, 2009, ISBN 978-80-213-1999-8
- [29] **ZAJÍČEK, Jaroslav**: *Použití semikvantitativních přístupů v analýzách spolehlivosti a rizika*, Věda a krizové situace 2009, Liberec, 2009, ISBN 978-80-7372-528-0
- [30] **ZAJÍČEK, Jaroslav**: *Used cars data processing and TÜV reliability statistics modification*, Reliability, Risk and Safety, Praha, 2009, ISBN 978-0-415-55509-8 (book), 978-0-203-85975-9 (ebook)

**Seznam tabulek:**

Tab. 1: Přehled analýz spolehlivosti	13
Tab. 2: Stupnice pro hodnocení pravděpodobnosti	22
Tab. 3: Stupnice pro hodnocení odhalitelnosti	23
Tab. 4: Stupnice pro hodnocení následků	23
Tab. 5: Základní statistické údaje	36
Tab. 6: Příklad aritmetické stupnice odhalitelnosti	40
Tab. 7: Příklad geometrické stupnice pravděpodobnosti	41
Tab. 8: Příklad stupnice s degresivním nárůstem pravděpodobnosti	42
Tab. 9: Příklad přiřazení intervalu kvantitativních hodnot a jejich zástupné hodnotě pro bodové hodnocení	43
Tab. 10: Přiřazení zástupných hodnot bodovým klasifikačním stupnic [1]	44
Tab. 11: Přiřazení zástupných hodnot bodovým klasifikačním	46
Tab. 12: Přiřazení zástupných hodnot hodnotícím stupňům	48
Tab. 13: Počty klesajících úseků pro funkční závislosti rizika z normy ČSN EN 60812:2006	53
Tab. 14: Počty klesajících úseků pro funkční závislosti rizika z normy VDA-Vol4 Product FMEA	53
Tab. 15: Hraniční hodnoty jednotlivých bodových hodnocení	57
Tab. 16: Určení intervalů zástupných hodnot pro různé kvocienty q	57
Tab. 17: Určení počtu úrovní stupnice při daném kvocientu q	58
Tab. 18: Část analýzy FMECA brzdové destičky	59
Tab. 19: Porovnání pořadí dle nového a stávajícího výpočtu RPN	60
Tab. 20: Zástupné hodnoty a aproximující funkce faktoru Intenzita výskytu události	64
Tab. 21: Zástupné hodnoty a aproximující funkce faktoru Náklady na obnovu objektu	65
Tab. 22: Zástupné hodnoty a aproximující funkce faktoru Náklady plynoucí z vlivu na zdraví a bezpečnost	66
Tab. 23: Zástupné hodnoty a aproximující funkce faktoru Délka objížďky	67
Tab. 24: Zástupné hodnoty a aproximující funkce faktoru Intenzita dopravy	68
Tab. 25: Zástupné hodnoty a aproximující funkce faktoru Doba do obnovy	68
Tab. 26: Převod rizika R na rizikové číslo RN	72
Tab. 27: Hodnoty vah pro dílčí vyhodnocení dat	73
Tab. 28: Vybrané objekty hodnocení	74
Tab. 29: Určení možných nežádoucích událostí a jejich bodové ohodnocení	75



Tab. 30: Zástupné hodnoty bodových ohodnocení	75
Tab. 31: Vyhodnocení nežádoucích událostí na daných objektech	76

Seznam obrázků:

Obr. 1: Prostý proces obnovy	8
Obr. 2: Sériový spolehlivostní model.....	10
Obr. 3: Dekompozice systému	18
Obr. 4: Funkční členění systému.....	19
Obr. 5: Příklad konstrukčního a funkčního členění systému	19
Obr. 6: Základní postup analýzy systému	20
Obr. 7: Matice kritičnosti	25
Obr. 8: Matice kritičnosti	26
Obr. 9: ITEM Toolkit FMECA - Ohodnocení události a výpočet rizikového čísla RPN.....	28
Obr. 10: Reliasoft FMEA - Ohodnocení události a výpočet rizikového čísla RPN.....	29
Obr. 11: Matice kritičnosti softwaru RRM	30
Obr. 12: Schéma postupu semikvantitativní analýzy FMECA	32
Obr. 13: Relativní četnosti bodových ohodnocení	36
Obr. 14: Hustota pravděpodobnosti a empirická distribuční funkce <i>RPN</i>	37
Obr. 15: Empirická distribuční funkce	37
Obr. 16: Příklad lineárního uspořádání a částečně uspořádané množiny (tzv. poset).....	39
Obr. 17: Příklad geometrické stupnice pravděpodobnosti	41
Obr. 18: Příklad stupnice s degresivním nárůstem pravděpodobnosti	42
Obr. 19: Závislost rizika na <i>RPN</i>	45
Obr. 20: Poměr maximálního a minimálního rizika v závislosti na <i>RPN</i>	45
Obr. 21: Závislost rizika na <i>RPN</i>	46
Obr. 22: Poměr maximálního a minimálního rizika v závislosti na <i>RPN</i>	47
Obr. 23: Riziko spočtené ze zástupných hodnot pro $q = 3$	49
Obr. 24: Závislost rizika na <i>RPN</i>	51
Obr. 25: Poměr maximálního a minimálního rizika v závislosti na <i>RPN</i>	51
Obr. 26: Závislost rizika na <i>RPN</i> – osa y logaritmicky	52
Obr. 27: Poměr maximálního a minimálního rizika v závislosti na <i>RPN</i>	52
Obr. 28: Absolutní chyba při použití bodové stupnice	55



Obr. 29: Relativní chyba při použití bodové stupnice.....	55
Obr. 30: Hustota pravděpodobnosti relativní chyby (VDA-Vol4).....	58
Obr. 31: Distribuční funkce relativní chyby (VDA-Vol4).....	59
Obr. 32: Struktura faktorů podílejících se na výsledném riziku	63
Obr. 33: Porovnání zástupných hodnot a aproximující funkce (Intenzita výskytu události).....	65
Obr. 34: Porovnání zástupných hodnot a aproximující funkce (Náklady plynoucí z vlivu na zdraví a bezpečnost)	66
Obr. 35: Porovnání zástupných hodnot a aproximující funkce (Délka objížďky)	67
Obr. 36: Porovnání zástupných hodnot a aproximující funkce (Intenzita dopravy)	68
Obr. 37: Porovnání zástupných hodnot a aproximující funkce (Doba do obnovy).....	69
Obr. 38: Mapa hodnocených objektů	74



Příloha 1

HODNOTÍCÍ STUPNICE ANALÝZ FMECA



Stupnice pravděpodobnosti poruchy

10 point

Value	Description	Criteria
1	Remote: Failure is unlikely	One occurrence in greater than five years or fewer than two occurrences in one billion events ($Cpk > 2.00$).
2	Remote: Failure is unlikely	One occurrence every three to five years or two occurrences in one billion events ($Cpk \approx 2.00$).
3	Low: Relatively few failures	One occurrence every one to three years or six occurrences in ten million events ($Cpk \approx 1.67$).
4	Low: Relatively few failures	One occurrence per year or six occurrences in 100,000 events ($Cpk \approx 1.33$).
5	Low: Relatively few failures	One occurrence every six months to one year or one occurrence in 10,000 events ($Cps \approx 1.17$).
6	Moderate: Occasional failures	One occurrence every three months or three occurrences in 1,000 events ($Cpk \approx 1.00$).
7	Moderate: Occasional failures	One occurrence every month or one occurrence in 100 events ($Cpk \approx 0.83$).
8	High: Repeated failures	One occurrence per week or a probability of 5 occurrences in 100 events ($Cpk \approx 0.67$).
9	High: Repeated failures	One occurrence every three to four days or probability of three occurrences in 10 events ($Cpk \approx 0.33$).
10	Very High: Failure is almost inevitable	More than one occurrence per day or a probability of more than three occurrences in 10 events ($Cpk < 0.33$).

AIAG Automotive PFMEA

Value	Description	Criteria
1	Remote: Failure is unlikely	≤ 0.01 per thousand pieces; $Ppk \Rightarrow 1.67$.
2	Low: Relatively few failures	0.1 per thousand pieces; $Ppk \Rightarrow 1.30$.
3	Low: Relatively few failures	0.5 per thousand pieces; $Ppk \Rightarrow 1.20$.
4	Moderate: Occasional failures	1 per thousand pieces; $Ppk \Rightarrow 1.10$.
5	Moderate: Occasional failures	2 per thousand pieces; $Ppk \Rightarrow 1.00$.
6	Moderate: Occasional failures	5 per thousand pieces; $Ppk \Rightarrow 0.94$.
7	High: Frequent failures	10 per thousand pieces; $Ppk \Rightarrow 0.86$.
8	High: Frequent failures	20 per thousand pieces; $Ppk \Rightarrow 0.78$.
9	Very High: Persistent failures	50 per thousand pieces; $Ppk \Rightarrow 0.55$.
10	Very High: Persistent failures	$\Rightarrow 100$ per thousand pieces; $Ppk \Rightarrow 0.55$.



ARP5580

Value	Description	Criteria
1	Remote: Failure unlikely	≤ 0.000000667 (1 in 1,500,000)
2	Low: Relatively Few Failures	0.000000667 , (1 in 150,000)
3	Low: Relatively Few Failures	0.0000667 , (1 in 15,000)
4	Moderate: Occasional Failures	0.0005 (1 in 2,000)
5	Moderate: Occasional Failures	0.0025 (1 in 400)
6	Moderate: Occasional Failures	0.0125 (1 in 80)
7	High: Repeated Failures	0.05 (1 in 20)
8	High: Repeated Failures	0.125 (1 in 8)
9	Very High: Failure is Almost Inevitable	0.33 (1 in 3)
10	Very High: Failure is Almost Inevitable	$\Rightarrow 0.5$ (greater than 1 in 2)

Automotive DFMEA

Value	Description	Criteria
1	Remote: Failure is unlikely	≤ 0.01 per thousand vehicles/items
2	Low: Relatively few failures	0.1 per thousand vehicle/items
3	Low: Relatively few failures	0.5 per thousand vehicle/items
4	Moderate: Occasional failures	1 per thousand vehicle/items
5	Moderate: Occasional failures	2 per thousand vehicle/items
6	Moderate: Occasional failures	5 per thousand vehicle/items
7	High: Frequent failures	10 per thousand vehicle/items
8	High: Frequent failures	20 per thousand vehicle/items
9	Very High: Persistent failures	50 per thousand vehicle/items
10	Very High: Persistent failures	$\Rightarrow 100$ per thousand vehicle/items

Automotive Five Point

Value	Description	Criteria
1	Very Low	≤ 1 in 10,000
2	Low or Minor	< 1 in 2,000
3	Moderate or Significant	≤ 1 in 500
4	High	< 1 in 50
5	Very High	$\Rightarrow 1$ in 10



Automotive MFMEA

Value	Description	Criteria
1	Failure occurs every 5 years	1 failure in 25,000 hours OR $R(t) < 98\%$: MTBF is 50 times greater than the user's required time.
2	Failure occurs every 2 years	1 failure in 10,000 hours OR $R(t) < 95\%$: MTBF is 20 times greater than the user's required time.
3	Failure occurs every year	1 failure in 5,000 hours OR $R(t) < 90\%$: MTBF is 10 times greater than the user's required time.
4	Failure occurs every 6 months	1 failure in 2,500 hours OR $R(t) < 85\%$: MTBF is 6 times greater than the user's required time.
5	Failure occurs every 3 months	1 failure in 1,000 hours OR $R(t) < 78\%$: MTBF is 4 times greater than the user's required time.
6	Failure occurs every month	1 failure in 350 hours OR $R(t) < 60\%$: MTBF is 2 times greater than the user's required time.
7	Failure occurs every week	1 failure in 80 hours OR $R(t) < 37\%$: MTBF is equal to the user's required time.
8	Failure occurs every day	1 failure in 24 hours OR $R(t) < 20\%$: MTBF is about 60% of the user's required time.
9	Failure occurs every shift	1 failure in 8 hours OR $R(t) < 5\%$: MTBF is about 30% of the user's required time.
10	Failure occurs every hour	1 failure in 1 hours OR $R(t) < 1\%$: MTBF is about 10% of the user's required time.

Automotive PFMEA

Value	Description	Criteria
1	Remote: Failure is unlikely	≤ 0.01 per thousand vehicles/items
2	Low: Relatively few failures	0.1 per thousand vehicle/items
3	Low: Relatively few failures	0.5 per thousand vehicle/items
4	Moderate: Occasional failures	1 per thousand vehicle/items
5	Moderate: Occasional failures	2 per thousand vehicle/items
6	Moderate: Occasional failures	5 per thousand vehicle/items
7	High: Frequent failures	10 per thousand vehicle/items
8	High: Frequent failures	20 per thousand vehicle/items
9	Very High: Persistent failures	50 per thousand vehicle/items
10	Very High: Persistent failures	≥ 100 per thousand vehicle/items

Electronics

Value	Description	Criteria
1	Very Low	≤ 1 in 1 million
2	Low or Minor	2 - 10 in 1 million
3	Moderate or Significant	11 - 25 in 1 million
4	High	26 - 50 in 1 million
5	Very High	> 50 in 1 million



Five Point

Value	Description	Criteria
1	Rare	< 1 per 10,000 to 1,000,000
2	Infrequent	2 to 10 per 10,000 to 1,000,000
3	Moderate	11 to 25 per 10,000 to 1,000,000
4	Frequent and High	26 to 50 per 10,000 to 1,000,000
5	Very high to catastrophic	> 50 per 10,000 to 1,000,000

Ford Auto MFMEA

Value	Description	Criteria
1	MTBF = 10,000 hrs	MTBF = 10,000 hrs OR 1 failure in 2 or more years.
2	MTBF = 5,000 hrs	MTBF = 5,000 hrs OR 1 failure per year.
3	MTBF = 2,500 hrs	MTBF = 2,500 hrs OR 1 failure every 6 months.
4	MTBF = 1,250 hrs	MTBF = 1,250 hrs OR 1 failure every 3 months.
5	MTBF = 415 hrs	MTBF = 415 hrs OR 1 failure per month.
6	MTBF = 100 hrs	MTBF = 100 hrs OR 1 failure per week.
7	MTBF = 20 hrs	MTBF = 20 hrs OR 1 failure per day.
8	MTBF = 10 hrs	MTBF = 10 hrs OR 1 failure per shift.
9	MTBF = 1 hrs	MTBF = 1 hrs OR 1 failure per hour.
10	MTBF = 5 min	MTBF = 5 min OR 1 failure every 5 minutes OR less.

Mechanical

Value	Description	Criteria
1	Very Low	<= 1 in 10,000
2	Low or Minor	2-10 in 10,000
3	Moderate or Significant	11-25 in 10,000
4	High	26-50 in 10,000
5	Very High	>50 in 10,000

Medical Devices

Value	Description	Criteria
1	Very Low	<= 1 in 100,000
2	Low or Minor	2-10 in 100,000
3	Moderate or Significant	11-25 in 100,000
4	High	26-50 in 100,000
5	Very High	>50 in 100,000



MIL-STD-1629A

Value	Description	Criteria
1	Level E - Extremely Unlikely	Probability of occurrence is essentially zero during item operating time interval. A single failure mode probability of occurrence is less than 0.001 of the overall probability of failure during the item operating time.
2	Level D - Remote	An unlikely probability of occurrence during item operating time interval. A single failure mode probability of occurrence is more than 0.001 but less than 0.01 of the overall probability of failure during the item operating time.
3	Level C - Occasional	An occasional probability of occurrence during item operating time interval. A single failure mode probability of occurrence is more than 0.01 but less than 0.1 of the overall probability of failure during the item operating time.
4	Level B - Reasonably Probable	A moderate probability of occurrence during the item operating time interval. A single failure mode probability of occurrence is more than 0.10 but less than 0.20 of the overall probability of failure during the item operating time.
5	Level A - Frequent	A high probability of occurrence during the item operating time interval. A single failure mode probability greater than 0.20 of the overall probability of failure during the item operating time interval.

Ten point

Value	Description	Criteria
1	Almost never	Failure unlikely. History shows no failures. $Cpk > 1.67$; $CNF/1000 < .00058$.
2	Remote	Rare number of failures likely. $Cpk > 1.50$; $CNF/1000 = .0068$.
3	Very slight	Very few failures likely. $Cpk > 1.33$; $CNF/1000 = .0063$.
4	Slight	Few failures likely. $Cpk > 1.17$; $CNF/1000 = .46$.
5	Low	Occasional number of failures likely. $Cpk > 1.00$; $CNF/1000 = 2.7$.
6	Medium	Moderate number of failures likely. $Cpk > .83$; $CNF/1000 = 12.4$.
7	Moderately high	Frequent high number of failures likely. $Cpk > .67$; $CNF/1000 = 46$.
8	High	High number of failures likely. $Cpk > .51$; $CNF/1000 = 134$.
9	Very high	Very high number of failures likely. $Cpk > .33$; $CNF/1000 = 316$.
10	Almost certain	Failure almost certain. History of failures exists from previous similar designs. $Cpk > .33$; $CNF/1000 = 316$.

Ten point 2

Value	Description	Criteria
1	Remote	Failure is unlikely. 1 in 1,500,000 (.66 PPM).
2	Low	Relatively few failures. 1 in 150,000 (6.66 PPM).
3	Low	Relatively few failures. 1 in 1,500 (666 PPM).
4	Moderate	Occasional failures. 1 in 2,000 (.05%).
5	Moderate	Occasional failures. 1 in 400 (.25%).
6	Moderate	Occasional failures. 1 in 80 (1.25%).
7	High	Repeated failures. 1 in 20 (5%).
8	High	Repeated failures. 1 in 8 (12.5%).
9	Very High	Failure is almost inevitable. 1 in 3 (33%).
10	Very High	Failure is almost inevitable. 1 in 2 (50%).



VDA-Vol4 Process FMEA

Value	Description	Criteria
1	Very slight	Assigned Failure Portion = 1 ppm. Occurrence of the failure cause is improbable.
2	Slight	Assigned Failure Portion = 50 ppm. Occurrence of the failure is slight, precise process.
3	Slight	Assigned Failure Portion = 100 ppm. Occurrence of the failure is slight, precise process.
4	Moderate	Assigned Failure Portion = 1,000 ppm. Occasional occurrence of the failure cause, less precise process.
5	Moderate	Assigned Failure Portion = 2,000 ppm. Occasional occurrence of the failure cause, less precise process.
6	Moderate	Assigned Failure Portion = 5,000 ppm. Occasional occurrence of the failure cause, less precise process.
7	High	Assigned Failure Portion = 10,000 ppm. Failure cause occurs repeatedly, imprecise process.
8	High	Assigned Failure Portion = 20,000 ppm. Failure cause occurs repeatedly, imprecise process.
9	Very high	Assigned Failure Portion = 50,000 ppm. Very frequent occurrence of the failure cause, unusable, unsuitable process.
10	Very high	Assigned Failure Portion = 100,000 ppm. Very frequent occurrence of the failure cause, unusable, unsuitable process.

VDA-Vol4 Product FMEA

Value	Description	Criteria
1	Very slight	Assigned Failure Portion = 1 ppm. Occurrence of the failure cause is improbable.
2	Slight	Assigned Failure Portion = 50 ppm. Occurrence of the failure is slight, proven design.
3	Slight	Assigned Failure Portion = 100 ppm. Occurrence of the failure is slight, proven design.
4	Moderate	Assigned Failure Portion = 500 ppm. Occasional occurrence of the failure cause, suitable design with suitably mature design.
5	Moderate	Assigned Failure Portion = 1,000 ppm. Occasional occurrence of the failure cause, suitable design with suitably mature design.
6	Moderate	Assigned Failure Portion = 5,000 ppm. Occasional occurrence of the failure cause, suitable design with suitably mature design.
7	High	Assigned Failure Portion = 10,000 ppm. Failure cause occurs repeatedly, problematic, immature design.
8	High	Assigned Failure Portion = 50,000 ppm. Failure cause occurs repeatedly, problematic, immature design.
9	Very high	Assigned Failure Portion = 100,000 ppm. Very frequent occurrence of the failure cause, unusable, unsuitable design concept.
10	Very high	Assigned Failure Portion = 500,000 ppm. Very frequent occurrence of the failure cause, unusable, unsuitable design concept.



Stupnice odhalitelnosti poruchy

10 Point

Value	Description	Criteria
1	Almost Certain	The defect is obvious or there is 100% automatic inspection with regular calibration and preventive maintenance of the inspection equipment.
2	Very High	All product is 100% automatically inspected.
3	High	An effective SPC program is in place with process capabilities (Cpk) greater than 1.33.
4	Moderately High	Statistical Process Control (SPC) is used in process and product is final inspected off-line.
5	Moderately High	Some Statistical Process Control (SPC) is used in process and product is final inspected off-line.
6	Low	Product is 100% manually inspected using go/no-go or other mistake-proofing gauges.
7	Very Low	Product is 100% manually inspected in the process.
8	Remote	Product is accepted based on no defectives in a sample.
9	Very Remote	Product is sampled, inspected and released based on Acceptable Quality Level (AQL) sampling plans.
10	Absolute Uncertainty	The product is not inspected or the defect caused by failure is not detectable.

Automotive DFMEA

Value	Description	Criteria
1	Almost Certain	Design Control will almost certainly detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode.
2	Very High	Very High chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode.
3	High	High chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode.
4	Moderately High	Moderate High chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode.
5	Moderate	Moderate chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode.
6	Low	Low chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode.
7	Very Low	Very Low chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode.
8	Remote	Remote chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode.
9	Very Remote	Very Remote chance the Design Control will detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode.
10	Absolute Uncertainty	Design Control will not and/or cannot detect a potential cause/mechanism and subsequent failure mode; or there is no Design Control.



Automotive MFMEA

Value	Description	Criteria
1	Very High	Design Controls almost certainly detect a potential cause and subsequent failure mode, machinery control not required.
2	Very High	
3	High	Design controls may detect a potential cause and subsequent failure mode. Machinery controls will prevent an imminent failure and isolate the cause.
4	High	
5	Medium	Design controls may detect a potential cause and subsequent failure mode. Machinery controls will provide an indicator of imminent failure.
6	Medium	
7	Low	Design or Machinery controls do not prevent the failure from occurring. Machinery controls will isolate the cause and subsequent failure mode after the failure has occurred.
8	Low	
9	Very Low	
10	Very Low	Design or Machinery controls cannot detect a potential cause and subsequent failure, or there are no design or machinery controls.

Automotive PFMEA

Value	Description	Criteria
1	Very High	Discrepant parts cannot be made because item has been error proofed by process/product design.
2	Very High	Error Proofed or Gauging Inspection. Error detection in-station (automatic gauging with automatic stop feature). Cannot pass discrepant part.
3	High	Error Proofed or Gauging Inspection. Error detection in-station, OR error detection in subsequent operations by multiple layers of acceptance: supply, select, install, verify. Cannot accept discrepant part.
4	Moderately High	Error Proofed or Gauging Inspection. Error detection in subsequent operations, OR gauging performed on setup and first-piece check (for stop causes only).
5	Moderate	Gauging Inspection. Control is based on variable gauging after parts have left the station, OR Go/No Go gauging performed on 100% of the parts after parts have left the station.
6	Low	Gauging or Manual Inspection. Control is achieved with charting methods, such as SPC (Statistical Process Control).
7	Very Low	Manual Inspection. Control is achieved with double visual inspection only.
8	Remote	Manual Inspection. Control is achieved with visual inspection only.
9	Very Remote	Manual Inspection. Control is achieved with indirect or random checks only.
10	Almost Impossible	Manual Inspection. Cannot detect or is not checked.

Five Point

Value	Description	Criteria
1	Almost Certain	Detectable before release.
2	Moderately High	Detectable after release but before production.
3	Medium	Detectable before reaching customer.
4	Slight	Detectable only by customer and/or during service.
5	Almost Impossible	Undetectable until catastrophe occurs.



Ford Auto MFMEA

Value	Description	Criteria
1	Almost Certain	Design Controls will almost certainly detect a potential cause and subsequent failure mode and will NOT require any Equipment Controls.
2	Very High	Very High chance the Design Controls will detect a potential cause and subsequent failure mode and will NOT require an Equipment Controls.
3	High	High chance the Design Controls will detect a potential cause and subsequent failure mode and will NOT require an Equipment Controls.
4	Moderately High	Moderately High chance th Design Control will detect a potential cause and subsequent failure mode and MAY require an Equipment Control.
5	Moderate	Moderate chance a Design Control will detect a potential cause and subsequent failure mode, or Equipment Control will prevent an imminent failure (stop machine) and isolate the cause.
6	Low	Low chance a Design Control will detect a potential cause and subsequent failure mode, and Equipment Control will prevent an imminent failure (stop machine).
7	Very Low	Very Low chance a Design Control will detect a potential cause and subsequent failure mode, and Equipment Control will prevent an imminent failure (stop machine).
8	Remote	Remote chance a Design Control will detect a potential cause and subsequent failure mode, and Equipment Control will provide indicator of imminent failure.
9	Very Remote	Very Remote chance a Design/Equipment Control will detect a potential cause and subsequent failure mode.
10	Absolute Uncertainty	Current controls will NOT and/or can NOT detect the cause of a potential cause and subsequent failure: or there is NO Design or Equipment Control.

Ten Point

Value	Description	Criteria
1	Almost Certain	Current controls almost always will detect the failure. Reliable detection controls are known and used in similar processes.
2	Very High	Very high likelihood current controls will detect the failure.
3	High	Good likelihood current contorls will detect the failure.
4	Moderately High	Moderately high likelihood current controls will detect the failure.
5	Medium	Medium likelihood current controls will detect the failure.
6	Low	Low likelihood current controls will detect the failure.
7	Slight	Slight likelihood current controls will detect the failure.
8	Very slight	Very slight likelihood current controls will detect the failure.
9	Remote	Remote likelihood current controls will detect the failure.
10	Almost impossible	No known controls available to detect the failure.



Ten Point 2

Value	Description	Criteria
1	Very High	Screening will almost certainly detect a potential failure mechanism.
2	Very High	Screening will almost certainly detect a potential failure mechanism.
3	High	Screening has a good chance of detecting a potential failure mechanism.
4	High	Screening has a good chance of detecting a potential failure mechanism.
5	Moderate	Screening may detect a potential failure mechanism.
6	Moderate	Screening may detect a potential failure mechanism.
7	Low	Screening not likely to detect a potential failure mechanism.
8	Low	Screening not likely to detect a potential failure mechanism.
9	Very Low	Screening probably will not detect a potential failure mechanism.
10	Certainty of Nondetection	Screening cannot detect a potential failure mechanism, or there is no screen.

VDA-Vol4 Process FMEA

Value	Description	Criteria
1	Very high	Certainty of the detection procedure: 99.9%. A failure that has occurred is certain to be detected.
2	High	
3	High	Certainty of the detection procedure: 99.9%. Detection of a failure that has occurred is very probable, tests are certain (e.g. several mutually independent tests).
4	Moderate	
5	Moderate	
6	Moderate	Certainty of the detection procedure: 99.7%. Detection of a failure that has occurred is probable, tests are relatively certain.
7	Slight	
8	Slight	Certainty of the detection procedure: 98%. Detection of a failure that has occurred is less probable, probably failure cause that cannot be detected, uncertain tests.
9	Very slight	
10	Very slight	Certainty of the detection procedure: 90%. Detection of a failure that has occurred is improbable, the failure cause is or cannot be tested.



VDA-Vol4 Product FMEA

Value	Description	Criteria
1	Very high	Certainty of the detection procedure: 99.9%. A failure that has occurred is certain to be detected.
2	High	
3	High	Certainty of the detection procedure: 99.9%. Detection of a failure that has occurred is very probable, confirmed by several mutually independent detection procedures.
4	Moderate	
5	Moderate	
6	Moderate	Certainty of the detection procedure: 99.7%. Detection of a failure that has occurred is probable. Reliability of the design could possibly be proven. Detection procedures are relatively certain.
7	Slight	
8	Slight	Certainty of the detection procedure: 98%. Detection of a failure that has occurred is less probable. Reliability of the design can probably not be proven. Detection procedures are uncertain.
9	Very slight	
10	Very slight	Certainty of the detection procedure: 90%. Detection of a failure that has occurred is unlikely. Reliability of the design was not or cannot be proven. Detection procedures are uncertain.

Stupnice následků poruchy

10 Point

Value	Description	Criteria
1	None	Failure would not be noticeable to the customer and would not affect the customer's process or product.
2	Very Minor	Failure may not be readily apparent to the customer, but would have minor effects on the customer's process or product.
3	Minor	Failure would create a minor nuisance to the customer, but the customer can overcome it in the process or product without performance loss.
4	Very Low	Failure can be overcome with modifications to the customer's process or product, but there is minor performance loss.
5	Low	Failure creates enough of a performance loss to cause the customer to complain.
6	Moderate	Failure results in a subsystem or partial malfunction of the product.
7	High	Failure causes a high degree of customer dissatisfaction.
8	Very High	Failure renders the unit operative or unfit for use.
9	Extremely High	Failure would create noncompliance with federal regulations.
10	Dangerously High	Failure could injure the customer or an employee.



ARP5580

Value	Description	Criteria
1	Non-Essential	Functions for which failures or design errors could not significantly degrade aircraft capability or crew ability.
2	Essential	Functions for which the occurrence of any failure condition or design error would reduce the capability of the aircraft or the ability of the crew to cope with adverse operating conditions.
3	Critical	Functions for which the occurrence of any failure condition or design error would prevent the continued safe flight and landing of the aircraft.

Automotive DFMEA

Value	Description	Criteria
1	None	No discernible effect.
2	Very Minor	Fit and finish/Squeak and rattle item does not conform. Defect noticed by discriminating customers (less than 25%).
3	Minor	Fit and finish/Squeak and rattle item does not conform. Defect noticed by 50% of customers.
4	Very Low	Fit and finish/Squeak and rattle item does not conform. Defect noticed by most customers (greater than 75%).
5	Low	Vehicle/Item operable but Comfort/Convenience item(s) inoperable. Customer somewhat dissatisfied.
6	Moderate	Vehicle/Item operable but Comfort/Convenience item(s) inoperable. Customer dissatisfied.
7	High	Vehicle/Item operable but at a reduced level of performance. Customer very dissatisfied.
8	Very High	Vehicle/Item inoperable (loss of primary function).
9	Hazardous with warning	Very high severity ranking when a potential failure mode affects safe vehicle operation and/or involves noncompliance with government regulation with warning.
10	Hazardous without warning	Very high severity ranking when a potential failure mode affects safe vehicle operation and/or involves noncompliance with government regulation without warning.



Automotive MFMEA

Value	Description	Criteria
1	None	Process parameter variability within specification limits. Adjustment or other process controls can be done during normal maintenance.
2	Very Minor	Process parameter variability not within specification limits. Adjustment or other process controls need to be taken during production. No downtime and no production of defective parts.
3	Minor	Downtime of up to 10 min but no production of defective parts.
4	Very Low	Downtime of between 10 and 30 min but no production of defective parts.
5	Low	Downtime of between 30 min and 1 hr or the production of defective parts for up to 1hr.
6	Moderate	Downtime of between 1 and 4 hrs or the production of defective parts for between 1 and 2 hrs.
7	High	Downtime of between 4 and 8 hrs or the production of defective parts for between 2 and 4 hrs.
8	Very High	Downtime of more then 8 hrs or the production of defective parts for more than 4 hrs.
9	Hazardous - With Warning	High severity ranking -- Affects operator, plan or maintenance personnel safety, and/or affects non-compliance with government regulations with warning.
10	Hazardous - Without Warning	Very high severity ranking -- Affects operator, plan or maintenance personnel, safety, and/or affects non-compliance with government regulations without warning.

Automotive PFMEA

Value	Description	Criteria
1	None	No discernible effect. OR Slight inconvenience to operation or operator or no effect.
2	Very Minor	Fit & finish/Squeak and rattle item does not conform. Defect noticed by discriminating customers (less than 25%). OR A portion (less than 100%) of the product may have to be reworked, with no scrap, on-line but in-station.
3	Minor	Fit & finish/Squeak and rattle item does not conform. Defect noticed by 50% of customers. OR A portion (less than 100%) of the product may have to be reworked, with no scrap, on-line but out-of-station.
4	Very Low	Fit & finish/Squeak and rattle item does not conform. Defect noticed by most customers (greater than 75%). OR The product may have to be sorted, with no scrap, an a portion (less than 100%) reworked.
5	Low	Vehicle/item operable but Comfort/Convenience item(s) operable at a reduces level of performance. Customer somewhat dissatisfied. OR 100% of product may have to be reworked, or vehicle/item repaired off-line but does not go to repair department.
6	Moderate	Vehicle/item operable but Comfort/Convenience item(s) operable. Customer dissatisfied. OR A portion (< than 100%) of the product may have to be scrapped with no sorting, or vehicle/item repaired in repair department with repair time less than 1/2 an hour.
7	High	Vehicle/item operable but at a reduced level of performance. Customer very dissatisfied. OR Product may have to be sorted and a portion (< than 100%) scrapped, or vehicle/item repaired in repair department with a repair time greater than one hour.
8	Very High	Vehicle/item inoperable (loss of primary function). OR 100% of product may have to be scrapped, or vehicle/item repaired in repai department with a repair time greater than one hour.
9	Hazardous with warning	Very high severity ranking when a potential failure mode affects safe vehicle operation and/or involves noncompliance with warning. OR May endanger operator (machine or assembly) with warning.
10	Hazardous without warning	Very high severity ranking when a potential failure mode affects safe vehicle operation and/or involves noncompliance with government regulation without warning. OR May endanger operator (machine or assembly) without warning.



Five Point

Value	Description	Criteria
1	Very Low or None	Minor nuisance.
2	Low or Minor	Product operable at reduced performance.
3	Moderate or Significant	Gradual performance degradation.
4	High	Loss of function.
5	Very High or Catastrophic	Safety-related catastrophic failures.

Ford Auto MFMEA

Value	Description	Criteria
1	Downtime <5min; No scrap, No rework	Downtime - Less than 5 minutes. No Scrap - No Rework. No safety issue.
2	Downtime <5min; Operator Fix	Downtime - Less than 5 minutes. Scrap - No part loss, operator fix required. No safety issue.
3	Downtime <30min; Operator Fix	Downtime - Less than 30 minutes. Scrap - No part loss, operator fix required. No safety issue.
4	Downtime <30min; Rework	Downtime - Less than 30 minutes. Scrap - no part loss, rework required. No safety issue.
5	Downtime 30-60min; QPC	Downtime - 30 to 60 minutes. Scrap - No part loss, quality process control required. No safety issue.
6	Downtime 1-2hrs; QPC	Downtime - 1 to 2 hours. Scrap - No part loss, quality process control required. No safety issue.
7	Downtime 2-4hrs; Scrap 1 part	Downtime - 2 to 4 hours. Scrap - Loss of one part. No safety issue.
8	Downtime >4hrs; Scrap >1 part	Downtime - More than 3 hours. Scrap - Loss of more than one part. No safety issue.
9	Safety - Minor	Safety - Minor hazard. (Any loss time injury not ranked as a 10.)
10	Safety - Immediate	Safety - Immediate life or limb threatening hazard.

MIL-STD-1629A

Value	Description	Criteria
1	Category IV - Minor	A failure not serious enough to cause injury, property damage, or system damage, but which will result in unscheduled maintenance or repair.
2	Category III - Marginal	A failure which may cause minor injury, minor property damage, or minor system damage which will result in delay or loss of availability or mission degradation.
3	Category II - Critical	A failure which may cause severe injury, major property damage, or major system damage which will result in mission loss.
4	Category I - Catastrophic	A failure which may cause death or weapon system loss (i.e. aircraft, tank, missile, ship, etc.).



Ten Point

Value	Description	Criteria
1	No effect	No effect on product or subsequent processes.
2	Very slight effect	Customer more likely will not notice the failure. Very slight effect on product/process performance. Nonvital fault noticed sometimes.
3	Slight effect	Customer slightly annoyed. Slight effect on product or process performance. Nonvital fault noticed most of the time.
4	Minor effect	Customer experiences minor nuisance. Minor effect on product/process performance. Fault does not require repair. Nonvital fault always noticed.
5	Moderate effect	Customer experiences some dissatisfaction. Moderate effect on product/process performance. Fault on nonvital part requires repair.
6	Significant effect	Customer experiences discomfort. Product/process performance degraded, but operable and safe. Nonvital part inoperable.
7	Major effect	Customer dissatisfied. Major effect on process; rework/repairs on part necessary. Product/process performance severely affected but functional and safe. Subsystem inoperable.
8	Extreme effect	Customer very dissatisfied. Extreme effect on process; equipment damaged. Product inoperable but safe. System inoperable.
9	Serious effect	Potential hazardous effect. Able to stop product without mishap; safety-related; time-dependent failure. Disruption to subsequent process operations. Compliance with government regulation is in jeopardy.
10	Hazardous effect	Hazardous effect. Safety-related -- sudden failure. Noncompliance with government regulation.

Ten Point 2

Value	Description	Criteria
1	Very Minor	Most customers would probably not even notice the failure.
2	Minor	Unreasonable to expect that the minor nature of this failure would cause any real effect on the system performance.
3	Low to Minor	The nature of the failure causes only slight annoyance. The customer will probably only notice a slight deterioration of performance.
4	Low	Customer will notice some subsystem or vehicle performance deterioration.
5	Moderate to Low	Customer is made uncomfortable or is annoyed by the failure
6	Moderate	Failure causes some customer dissatisfaction.
7	High to Moderate	Can also be an inoperable convenience system (e.g. air conditioning system). Does not involve safety aspects.
8	High to Moderate	High customer dissatisfaction due to the nature of the failure, such as a major system (e.g. automobile engine) function being inoperative.
9	Very High	Indicates a potential failure mode that could cause death with warning.
10	Very High	Indicates a potential failure mode that could cause death without warning.



VDA-Vol4 System FMEA

Value	Description	Criteria
1	Very Slight	Very slight function impairment, only detectable by specialists.
2	Slight	
3	Slight	Slight vehicle function impairment, repair at next scheduled visit to a repair shop. Degraded function in operating and comfort systems.
4	Moderate	
5	Moderate	
6	Moderate	Vehicle operability is restricted, immediate visit to a repair shop not absolutely necessary. Degraded function in important operating and comfort systems.
7	High	
8	High	Vehicle operability is severely restricted immediately stay in a repair shop is urgently required. Degraded function in important operating and comfort systems.
9	Very High	
10	Very High	Safety risk, non-compliance with legal regulations, breakdown.



Příloha 2

ZDROJOVÉ KÓDY MATLAB



Závislost reálného rizika na hodnotách RPN

```
pb(1:10)=1:10;
ob(1:10)=1:10;
db(1:10)=1:10;

pr=[0.000001,0.00005,0.0001,0.0005,0.001,0.005,0.01,0.05,0.1,0.5];
or=[0.001,0.001,0.001,0.001,0.002,0.003,0.009,0.02,0.04,0.1];

kd=2;

for a=1:10
    dr(a)=(a)/10;
end

e=1;
bod(1)=1;
for a=1:10
    for b=1:10
        for c=1:10
            vb(a,b,c)=pb(a)*ob(b)*db(c);
            vr(a,b,c)=pr(a)*or(b)*dr(c);
            x=0;
            for d=1:e
                if vb(a,b,c)==bod(d)
                    x=1;
                end
            end
            if x==0
                e=e+1;
                bod(e)=vb(a,b,c);
            end
        end
    end
end
pocetbodu=e;

for a=1:10
    for b=1:10
        for c=1:10
            for d=1:pocetbodu
                if pb(a)*ob(b)*db(c)==bod(d)
                    m(d)=vr(a,b,c);
                end
            end
        end
    end
end
```



```
        end
    end
end

x=1;
while x==1
    x=0;
    for a=1:e-1
        if bod(a)>bod(a+1)
            pom=bod(a);
            bod(a)=bod(a+1);
            bod(a+1)=pom;
            pom=m(a);
            m(a)=m(a+1);
            m(a+1)=pom;
            x=1;
        end
    end
end

mi=m;
ma=m;

for a=1:10
    for b=1:10
        for c=1:10
            for d=1:pocetbodu
                if pb(a)*ob(b)*db(c)==bod(d)
                    if mi(d)>vr(a,b,c)
                        mi(d)=vr(a,b,c);
                    end
                    if ma(d)<vr(a,b,c)
                        ma(d)=vr(a,b,c);
                    end
                end
            end
        end
    end
end

figure(1);
subplot(3,1,1);

plot(bod,mi,bod,ma)
title('Zavislost realneho rizika (min/max) na RPN')
```



```
subplot(3,1,2);
semilogy(bod,mi,bod,ma)
title('Zavislost realneho rizika (min/max) na RPN - logaritmicky')

subplot(3,1,3);
for a=1:pocetbodu
    nrozdil(a)=ma(a)/mi(a);
end
plot(bod,nrozdil)
title('Pomer max/min')

save mi.csv bod mi ma -ascii
```

Určení chyby v celkovém hodnocení dle VDA-Vol4

```
clear all
clc

zaklad=2

minp=zaklad^(-0.5)
maxp=zaklad^(0.5)
mino=zaklad^(-0.5);
maxo=zaklad^(0.5);
minn=zaklad^(-0.5);
maxn=zaklad^(0.5);

dilku=10;
for a=1:dilku
    p(a)=minp+(a-1)*(maxp-minp)/(dilku-1)
    o(a)=mino+(a-1)*(maxo-mino)/(dilku-1);
    n(a)=minn+(a-1)*(maxn-minn)/(dilku-1);
end;

d=1;
for a=1:dilku
    for b=1:dilku
        for c=1:dilku
            r(d)=p(a)*o(b)*n(c);
            d=d+1;
        end
    end
end

minv=min(r);
maxv=max(r);
```



```
dilku2=dilku;
v(1:dilku2)=0;
for a=1:dilku^3
    for b=1:dilku2
        if r(a)>=minv+(b-1)*(maxv-minv)/dilku2
            if r(a)<minv+b*(maxv-minv)/dilku2
                v(b)=v(b)+1/dilku^3;
            end
        end
    end
end
end

for a=1:dilku2
    x(a)=minv+(a-1)*(maxv-minv)/dilku2;
end

figure(1);
plot(x,v);

for a=1:dilku2
    v(a)=v(a)/((maxv-minv)/dilku2);
end

figure(2);
plot(x,v);
title('Hustota pravdepodobnosti');

save mi.csv x v -ascii
```