



TECHNICKÁ UNIVERZITA  
V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky  
a mezioborových studií

POSTUPY SEMIKVANTITATIVNÍ  
ANALÝZY FMECA

*Autoreferát disertační práce*

Vypracoval:

Ing. Jaroslav Zajíček

Školitel:

Doc. RNDr. Miroslav Koucký, CSc.



## 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 je dále popis 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

<b>1.</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>Cíle disertace.....</b>	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>FMEA/FMECA .....</b>	<b>6</b>
<b>3.1</b>	<b>Normy, standardní postupy .....</b>	<b>6</b>
3.1.1	Kvalitativní analýza.....	8
3.1.2	Kvantitativní analýza.....	8
3.1.3	Semikvantitativní analýza .....	9
<b>3.2</b>	<b>Rešerše odborných publikací.....</b>	<b>11</b>
<b>4.</b>	<b>Modifikace FMECA - řešení .....</b>	<b>14</b>
<b>4.1</b>	<b>Hodnocené faktory .....</b>	<b>14</b>
<b>4.2</b>	<b>Hodnotící stupnice .....</b>	<b>15</b>
<b>4.3</b>	<b>Analýza stávajících postupů .....</b>	<b>17</b>
<b>4.4</b>	<b>Metodika výpočtu výsledného rizikového čísla.....</b>	<b>22</b>
<b>4.5</b>	<b>Porovnání stávajících a doporučených postupů .....</b>	<b>25</b>
<b>4.6</b>	<b>Určení průměrné chyby od plně kvantitativního přístupu.....</b>	<b>26</b>
4.6.1	Chyba v hodnocení jednoho faktoru .....	26
4.6.2	Chyba v celkovém vyhodnocení dle VDA-Vol4 .....	27
<b>4.7</b>	<b>Případová studie - porovnání postupů .....</b>	<b>29</b>
<b>5.</b>	<b>Začlenění metody FMECA do struktury norem .....</b>	<b>30</b>
<b>6.</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>31</b>
	<b>Literatura.....</b>	<b>32</b>



## 1. Úvod

O problematiku spolehlivosti výrobků/systemů 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 - analýzu druhů, důsledků a kritičnosti poruchových stavů FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis).

## 2. Cíle disertace

Hlavním cílem disertační práce je vytvoření metodiky pro výpočet rizikového čísla semikvantitativně prováděné analýzy FMECA a její demonstrace na 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 hranici jsou stanovena nápravná opatření pro jeho snížení nebo pro eliminaci způsobu poruchy změnou návrhu. Současné postupy neakceptují strukturu bodových stupnic, čímž při vyhodnocení dochází mnohdy ke stanovení rizikového čísla chybně. 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. FMEA/FMECA**

#### **3.1 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.

Riziko i rizikové číslo 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. 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, která je vhodné v analýze zohlednit. Tím se minimalizují možnosti opomenutí vyšetřit a ohodnotit všechny pro daný prvek relevantní informace.

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 nejnížší úrovni podrobeny systematickému zkoumání. Tuto nejnížší úroveň je třeba nejdříve určit dekompozicí systému (neboli tzv. konstrukčním rozpadem systému), 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 nejnížší 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.

V následujícím kroku je nutné pro všechny prvky na zvolené nejnížší 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, podsystemů a především pak samotného systému. Pouhé přímé určení vlivu na funkce samotného systému může způsobit opomenutí některých funkčních vazeb. 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.

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

### **3.1.1 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.

### **3.1.2 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. Přestože je pravděpodobnost bezrozměrnou veličinou, bývá často reprezentována intenzitou 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 hodnotou [Kč]. Tento typ analýzy poskytuje číselné výstupy v příslušných jednotkách, tedy například [ $Kč \cdot h^{-1}$ ], je však časově náročný a klade výrazné požadavky na vstupní data.

Jak již bylo zmíněno, stávající model popsaný v normách 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 zákazníkovi, přičemž 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).

### 3.1.3 Semikvantitativní analýza

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.



Tab. 1: Zkrácená stupnice pro hodnocení pravděpodobnosti

Kvalitativní popis	Klasifikace	Četnost	Pravděpodobnost
Velice slabá: Porucha je nepravděpodobná	1	≤ 0,010 na tisíc vozidel/objektů	≤ 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
...	...	...	...

Tab. 2: Zkrácená 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
...	...	...

Tab. 3: Zkrácená stupnice pro hodnocení následků

Následky	Kritéria	Klasifikace
Žádné	Žádný zjistitelný 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
...	...	...

### 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 vypočtena ze vztahu:

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



- P* semikvantitativně vyjádřená pravděpodobnost poruchy,  
*O* semikvantitativně vyjádřená odhalitelnost poruchového stavu,  
*N* semikvantitativně vyjádřené následky poruchy.

### **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.

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

## **3.2 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 [6], [9], 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 4.4. Absence jednotek není pro účel řazení důležitá.

Ad 2: Podrobná analýza používaných hodnotících stupnic je součástí kapitoly 4.2. 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* 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 včetně návrhu 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 to, které sníží *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 literatuře:**

- A. Nahrazení následků součinem finančních následků na jednotku chybného výrobku a počtu těchto výrobků. [6]
- B. Vybrané faktory lze zvýraznit/potlačit změnou bodového rozsahu stupnic. [6]
- C. Nahrazení bodového ohodnocení pravděpodobnosti nastoupení poruchy za výraz  $2^x$ , kde  $x$  je bodové ohodnocení. [6]
- D. Pomocí teorie sítí hledat nejzávažnější příčiny, nikoliv nejzávažnější způsoby poruch (jedna příčina může způsobit více poruch). [9]
- E. Zaměřit se na hodnocení poskytnutá zákazníky. Upravení faktoru následků pomocí KANO modelů. [5]
- 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. [10]
- G. Přejít na stanovení *RPN* fuzzy způsobem. [11]

#### **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 jejich 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 C. 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.

## 4. Modifikace FMECA - řešení

Na základě provedené rešerše, především kritického zhodnocení nedostatků FMECA v kapitole 3.2, jsou navrženy změny, které vedou k rozšíření aplikovatelnosti díky možnosti volit hodnocené faktory (kap. 4.1) a strukturu hodnotících stupnic (kap. 4.2). 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. 4.3 až 4.6).

### 4.1 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.

## 4.2 Hodnotící stupnice

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

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 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 diference (značíme  $d$ ) a je pro celou stupnici konstantní. Aritmetická stupnice je tedy popsána takto:

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



Pokud předpokládáme, že hodnocené faktory nabývají pouze kladných reálných hodnot a dále  $a_1 = d$ , pak můžeme psát:

$$a_i = a_1 \cdot i \text{ nebo analogicky } a_i = d \cdot i \quad (4)$$

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  $< 0; 100\%$ ) 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:

$$a_i = a_{i-1} \cdot q, \quad (5)$$

kde první člen posloupnosti označíme  $a_1$ .

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 diference není konstantní hodnota, ale funkce závislá na proměnné  $i$ . Podmínkou je, aby hodnota diference 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.





### 4.3 Analýza stávajících postupů

Riziko v semikvantitativně prováděné analýze FMECA lze určit buď 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. Pomocí postupů uvedených níže lze obdobnou analýzu provést pro libovolné hodnotící stupnice.

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

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. 1-3, 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. 1. 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 bodu 2, 3 a 4, kde 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)

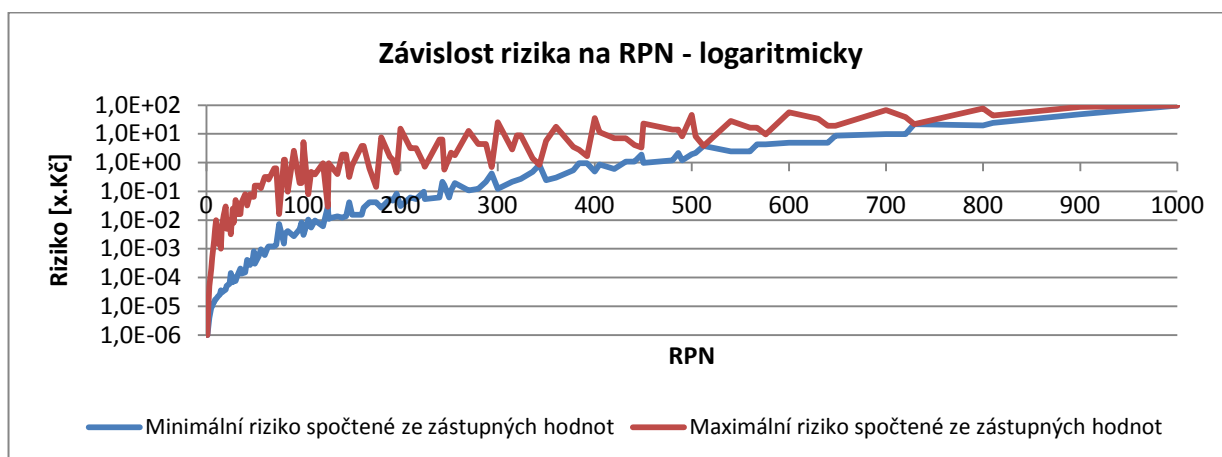
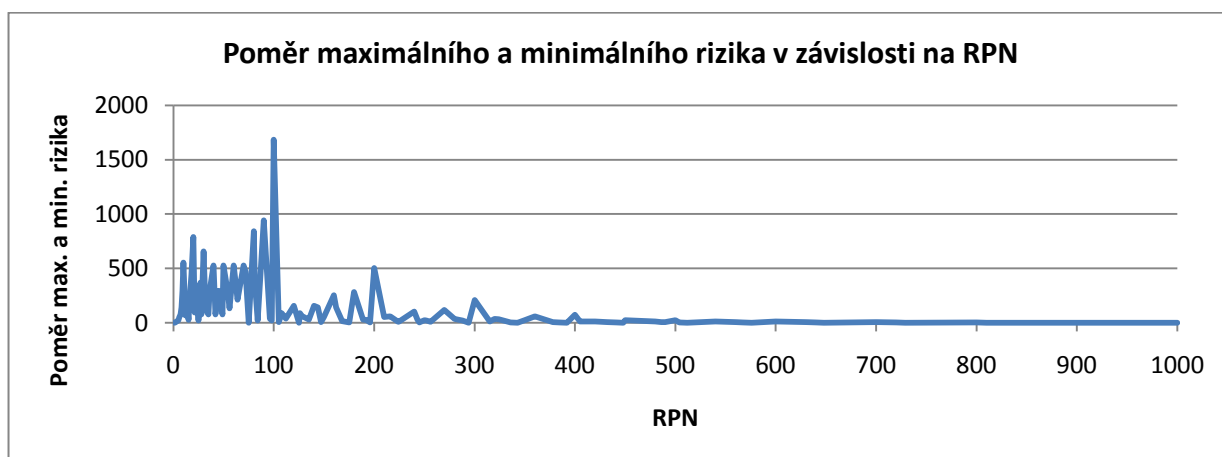
9 - Způsob poruchy ovlivňuje bezpečnost nebo způsobí nesoulad s vládními předpisy

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 kvocientem  $q = 2$ , 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. 4: Přiřazení zástupných hodnot bodovým klasifikacím 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. 1 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. 2) 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. 1: Závislost rizika na *RPN*Obr. 2: Poměr maximálního a minimálního rizika v závislosti na *RPN*

Na obr. 2 vidíme, že v první desetině rozsahu rizikových čísel *RPN*, tedy na množině  $\{1, \dots, 100\}$ , kde se v praxi vyskytuje nejvíce ohodnocených událostí, 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  $P = 10$ ;  $O = 1$ ;  $N = 10$ ).

### VDA-Vol4 Product FMEA

Tato varianta odpovídá stupnicím uvedeným v normě VDA-Vol4, používané automobilovým koncernem Volkswagen Group. U stupnice pravděpodobnosti a odhalitelnosti je zástupná hodnota jednotlivých bodových hodnocení jednoznačně přiřazena, stupnice

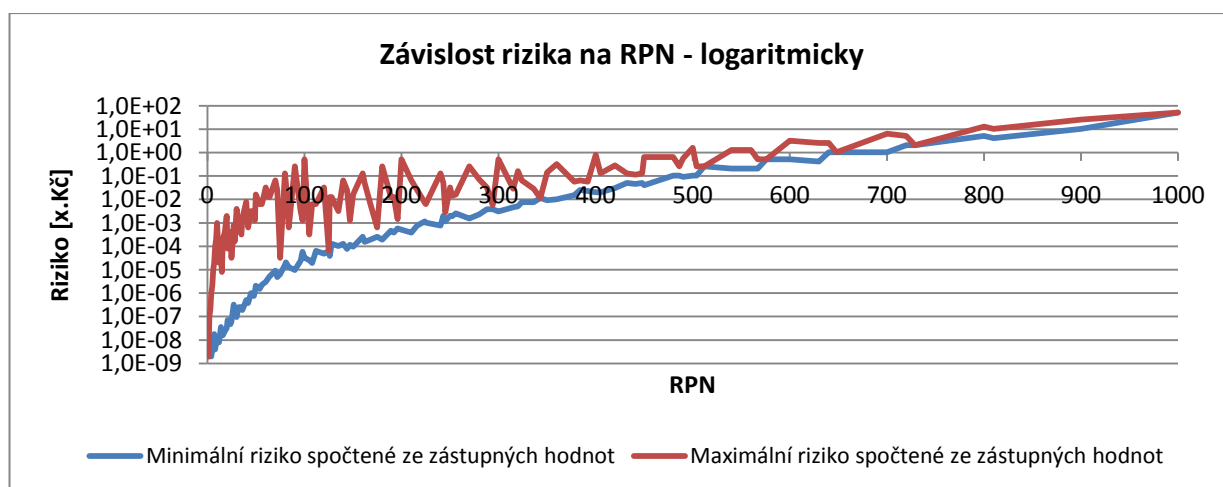


následků bude aproximována geometrickou posloupností s kvocientem  $q = 2$ , a to ze stejných důvodů jako u normy ČSN EN 60812:2006 - viz výše.

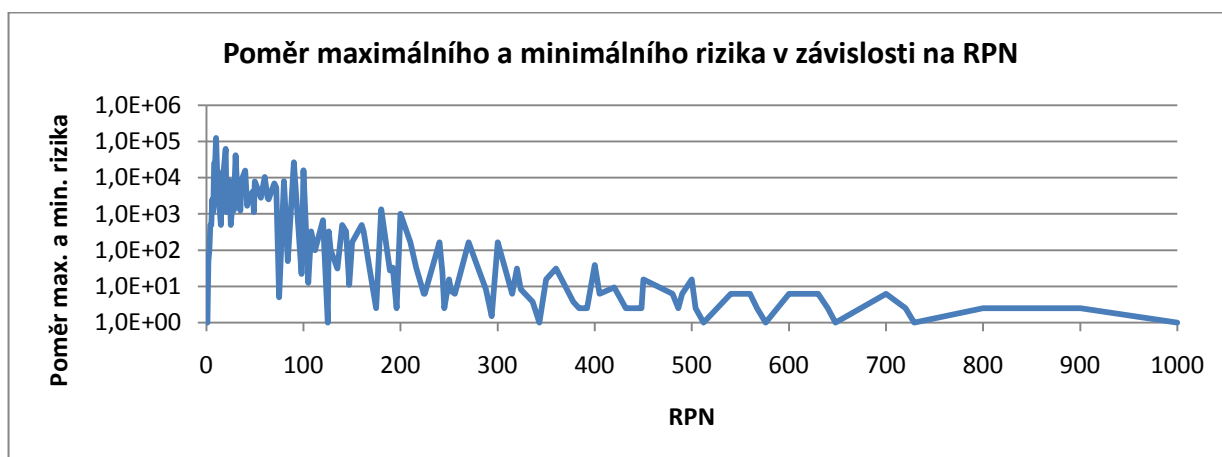
Tab. 5: Přiřazení zástupných hodnot bodovým klasifikacím

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	$k \cdot 2^{10}$

Grafy na obr. 3 a 4 zobrazují závislost vypočteného rizika ze zástupných hodnot na hodnotách *RPN* a poměr maximální a minimální hodnoty rizika pro dané *RPN*.



Obr. 3: Závislost rizika na *RPN*



Obr. 4: Poměr maximálního a minimálního rizika v závislosti na *RPN*

Z grafu na obr. 4 vidíme, že poměr maximálního a minimálního rizika dosahuje až řádu desetitísiců (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.

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.



#### 4.4 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:

$$RPN = f_P(P) \cdot f_N(N), \quad (6)$$

pro hodnocení 2 faktorů (pravděpodobnost a následky) a

$$RPN = f_P(P) \cdot f_O(O) \cdot f_N(N), \quad (7)$$

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 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  $a_{n1}$ . Z toho dále platí, že pro aritmetickou stupnici je dostačující použít zástupnou funkci  $f_\bullet(i) = i$  a pro geometrickou  $f_\bullet(i) = q_\bullet^i$ .

#### ČSN EN 60812:2006

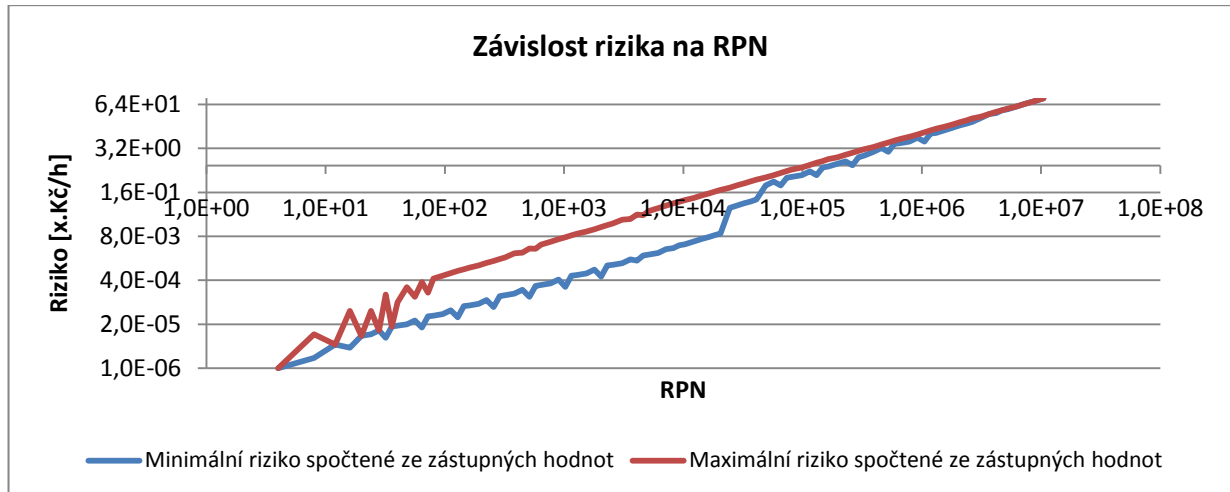
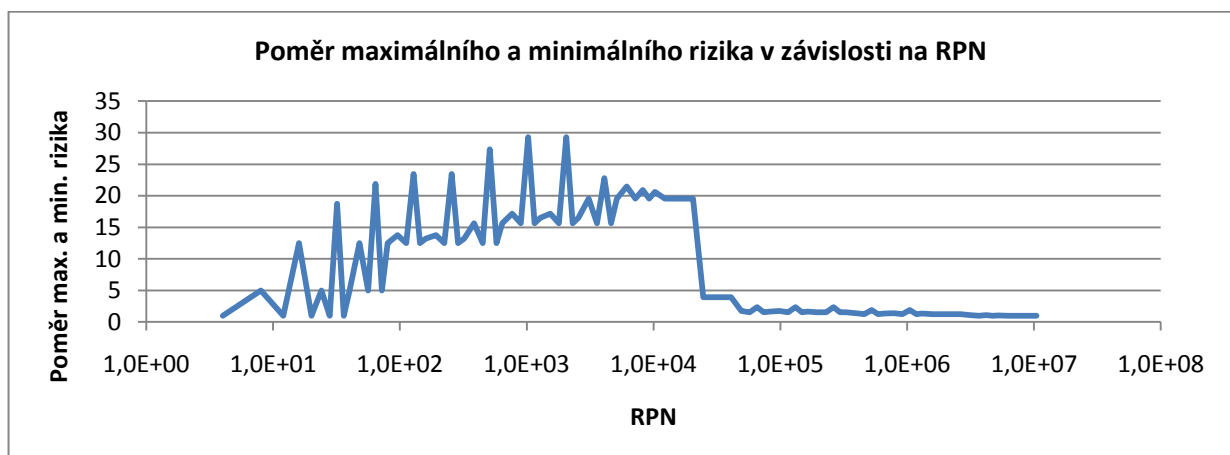
Jak již bylo uvedeno, stupnice hodnocení pravděpodobnosti a následků odpovídají přibližně geometrické posloupnosti se základem 2, stupnice hodnocení odhalitelnosti je lineární. Výsledný výpočet  $RPN$  tedy odpovídá vztahu:

$$RPN = 2^P \cdot O \cdot 2^N \quad (8)$$

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 rozsah funkčních hodnot nemění. Důležitá je změna průběhu funkce a poměr maximálního a minimálního rizika u jednotlivých *RPN*. Funkce jsou na rozdíl od původního výpočtu *RPN* hladší, viz následující grafy.

Obr. 5: Závislost rizika na *RPN*Obr. 6: 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:

$$RPN = 2^P \cdot 2^O \cdot 2^N \quad (9)$$



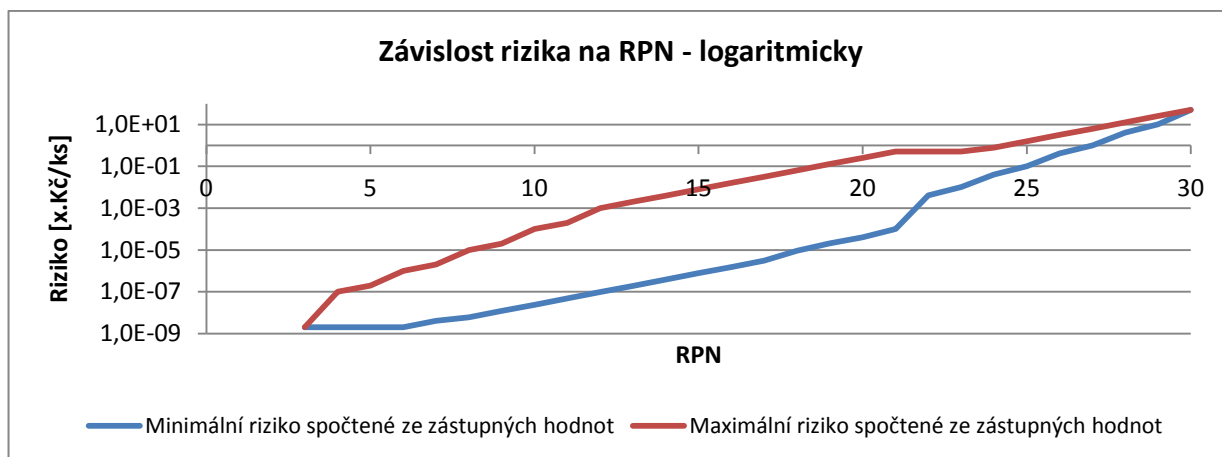
Tento vztah lze nyní upravit na:

$$RPN = 2^{P+O+N} \quad (10)$$

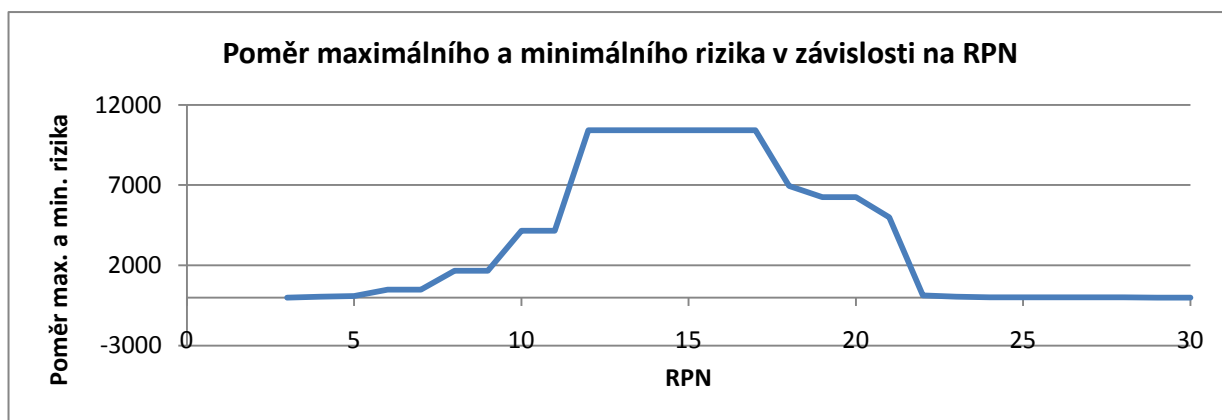
Jak již bylo zmíněno, úkolem  $RPN$  je pouze stanovení pořadí hodnocených událostí. K tomuto účelu je tedy možné rizikové číslo  $RPN$  počítat pouze jako prostý součet dílčích bodových hodnocení:

$$RPN = P + O + N \quad (11)$$

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. 5) se rozsah funkčních hodnot nemění a funkce jsou na rozdíl od původního výpočtu  $RPN$  při proložení křivkou hladší - viz následující grafy.



Obr. 7: Závislost rizika na  $RPN$  – osa y logaritmicky



Obr. 8: Poměr maximálního a minimálního rizika v závislosti na  $RPN$





#### 4.5 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, 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 na vztah:

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

V případě, že jednotlivá riziková čísla  $RPN$  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 hodnot rizika v závislosti na  $RPN$ .

Počet klesajících úseků včetně relativních počtů je uveden v tab. 6 a v tab. 7. 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. 6: 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. 7: Počty klesajících úseků pro funkční závislosti rizika z normy VDA-Vol4 Product FMEA

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.

## 4.6 Určení průměrné chyby od plně kvantitativního přístupu

### 4.6.1 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 diskretních hodnot) je tak aproximován do několika diskretních 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,
- $\Delta$  absolutní chyba bodového hodnocení oproti zástupné hodnotě,
- $\delta$  relativní chyba bodového hodnocení oproti zástupné hodnotě.

### Aritmetická stupnice

Nejjednodušší kvantifikace chyby je pro případ, kdy ukazatel může nabývat hodnot v intervalu  $(x; y)$ , 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:

$$\Delta = \frac{y-x}{a} \cdot \left(b - \frac{1}{2}\right) + x - r, \quad (12)$$



relativní chybu kvantifikujeme jako:

$$\delta = \frac{\frac{y-x}{a} \cdot \left(b - \frac{1}{2}\right) + x - r}{r}. \quad (13)$$

### Geometrická stupnice

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:

$$\Delta = k \cdot q^b - r, \quad (14)$$

relativní chybu kvantifikujeme jako:

$$\delta = \frac{k \cdot q^b - r}{r}. \quad (15)$$

#### 4.6.2 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 první a poslední hodnotící stupeň. 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.

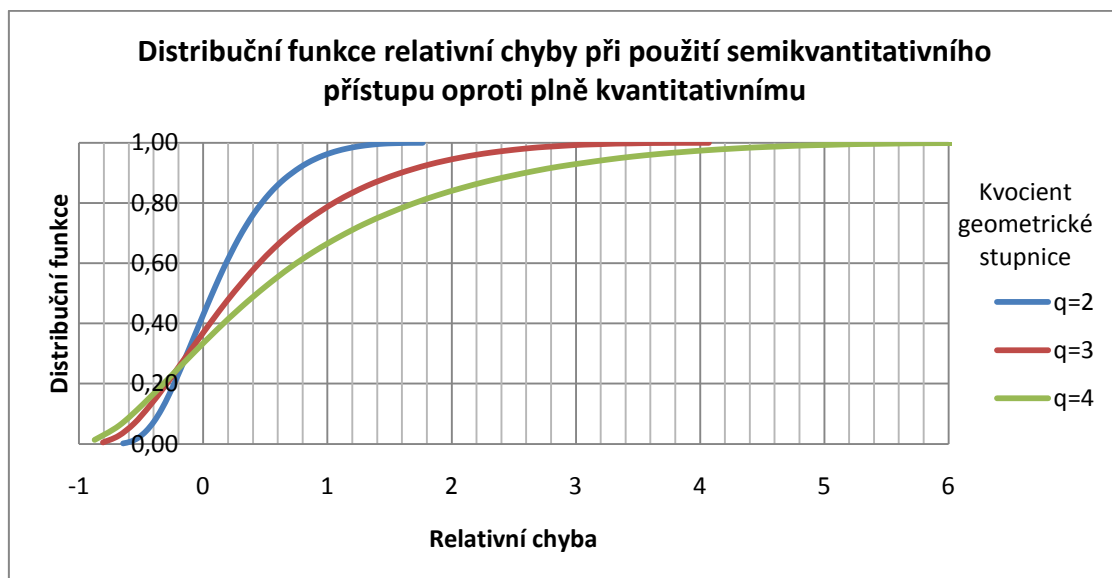
Tab. 8: Hraniční hodnoty jednotlivých bodových hodnocení

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; $\infty$ )
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; $\infty$ )

Bodovému hodnocení  $b$  tedy odpovídají reálné hodnoty od  $q^{-\frac{1}{2}}$  do  $q^{\frac{1}{2}}$  násobku zástupné hodnoty  $k \cdot q^b$ .

Ve výsledném ohodnocení pomocí *RPN* dochází k chybě, jejíž distribuční funkce je zobrazena na následujícím grafu (obr. 9). 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.



Obr. 9: Distribuční funkce 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  $q = 4$ ).



#### 4.7 Případová studie - porovnání postupů

V kapitole 4.5 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. 9: 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 (stříh) 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 (10) a (11), získáváme nové pořadí nežádoucích událostí:

Tab. 10: 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 (10)	Nové <i>RPN</i> dle (11)	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 4.3 a 4.4 považujeme za správné, se zásadním způsobem liší. Například nejrizikovější poruchový stav „(f) Přetržení (střih) 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 (10) 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.

## 5. 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“.



## 6. 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 4.3 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 4.4 jsou navrženy obecně platné postupy pro libovolné hodnotící stupnice, které díky tomu mohou být modifikovány na základě specifických vlastností hodnocených objektů a požadavků analytika.

Dílčím způsobem je v této práci modifikován i postup zjištění vazeb mezi komponentami systému (kapitola 3 - 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 příkladu (kapitola 4.7), který se týká brzdové destičky osobního automobilu. Druhý příklad s návrhem vícefaktorového modelu byl z autoreferátu odebrán kvůli snížení rozsahu. 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] ARVANITTOYANNIS, 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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)
- [11] 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.
- [12] FUCHS, Pavel, *Využití spolehlivosti v provozní praxi*, skriptum, Liberec 2002
- [13] 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.