



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

## POSOUZENÍ SPOLEHLIVOSTI PROCESU VÝROBY PRŮMYSLOVÝCH BEZPEČNOSTNÍCH PŘILEB

RELIABILITY ASSESSMENT OF THE SAFETY HELMETS MANUFACTURING PROCESS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Csaba Kartali

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

BRNO 2020



# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	<b>Bc. Csaba Kartali</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Posouzení spolehlivosti procesu výroby průmyslových bezpečnostních přileb**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Pro středně velké a velké strojírenské podniky je pro udržení konkurenceschopné výroby přínosné zavést a udržovat systém managementu kvality. Mezi jedny ze základních nástrojů preventivního zabezpečování kvality patří například vývojový diagram, kontrolní plán nebo FMEA. Dalším významným prvkem managementu kvality je monitoring nákladů spojených s nekvalitou, identifikace příležitostí a návrhy preventivních opatření pro jejich snižování.

### **Cíle diplomové práce:**

- Provést analýzu výrobního procesu bezpečnostních přileb.
- Definovat cíle jakosti/kvality u tohoto výrobního procesu.
- Systémový rozbor řešené problematiky.
- Výběr vhodné metody/nástroje pro posouzení kvality/spolehlivosti.
- Aplikace vybrané metody/nástroje.
- Analýza přínosů vybrané metody/nástroje.
- Vlastní závěry a/nebo doporučení.

### **Seznam doporučené literatury:**

ČSN ISO 18404. Kvantitativní metody zlepšování procesu: Six Sigma - Kompetence klíčového personálu a jejich uspořádání ve vztahu k implementaci Six Sigma a Lean. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

ČSN ISO 13053-2. Kvantitativní metody zlepšování procesu: Six Sigma - Část 2: Nástroje a postupy. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

ČSN EN IEC 60812. Analýza způsobů a důsledků poruch (FMEA a FMECA). Druhé vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.

ČSN EN 61025. Analýza stromu poruchových stavů (FTA). Praha: Český normalizační institut, 2007.

ČSN EN ISO 9001. Systémy managementu kvality: Požadavky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

ČSN EN ISO 9004. Management kvality: Kvalita organizace - Návod k dosažení udržitelného úspěchu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.

ČSN ISO 10014. Management kvality: Směrnice pro dosahování finančních a ekonomických přínosů. Praha: Český normalizační institut, 2007.

Infozdroje.cz. Infozdroje.cz [online]. Praha: Albertina icome Praha s.r.o., 2016 [cit. 2016-11-04]. Dostupné z: [www.infozdroje.cz](http://www.infozdroje.cz)

ČSN online [online]. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016 [cit. 2016-11-04]. Dostupné z: <https://csnonline.agentura-cas.cz/>

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20.

V Brně, dne 15. 11. 2019



doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

V teoretické části této diplomové práce jsou uvedeny všechny nezbytné předpoklady, které jsou nutné k provedení úplného a komplexního posouzení spolehlivosti daného procesu. Za tímto účelem poskytuje obecný přehled spolehlivosti, matematických a statistických pokynů společně s podrobnějším obrazem popisu procesu kvantifikovatelnými ukazateli. Dále poskytuje přehled dvou důležitých analytických nástrojů, jako jsou FTA a FMEA, doplněný základním principem a shrnutím nástrojů metodiky Six Sigma. Praktická část diplomové práce se zabývá podrobným popisem, kvantifikací a cíli procesu výroby a testování bezpečnostních průmyslových přileb, aby bylo možné provést vhodné posouzení spolehlivosti pomocí potřebné sady nástrojů a metod za účelem identifikovat poruchy a jejich příčiny v procesu pomocí vhodných prostředků, jako jsou změny a nápravné opatření.

## **ABSTRACT**

The theoretical part of this master thesis lists all the necessary prerequisites which are needed in order to carry out a full and comprehensive reliability assessment of any given process. To do so it provides an overview of reliability in general, mathematical and statistical guidance together with a more detailed picture of the application and description of the process by quantifiable indicators. Furthermore it gives an overview of two important analysis tools, such as FTA and FMEA, accompanied by the basic principle and summary of the Six Sigma methodology and tools. The practical part of the thesis deals with the detailed description, quantification and goals of the process of safety helmet manufacturing and testing in order to be able to carry out a suitable assessment of the reliability by using the necessary set of tools and methods in order to identify the failures and their causes in the process by addressing them with suitable means of changes and corrective actions.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Posouzení spolehlivosti, metody analýzy spolehlivosti, bezpečnostní přilba, analýza způsobů a důsledků poruch, Paretova analýza, výkonnost procesu, kontrolní plán.

## **KEYWORDS**

Reliability assessment, reliability analysis methods, safety helmet, failure mode and effects analysis, Pareto analysis, process efficiency, control plan.



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KARTALI, C. *Posouzení spolehlivosti procesu výroby průmyslových bezpečnostních přileb*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2020, 111 s., Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu panu doc. Ing. Petru Blechovi za cenné připomínky, odborné rady a trpělivost, kterými přispěl k vypracování této práce. Dále bych rád poděkoval své manželce za neocenitelnou podporu a trpělivost, kterou mi v tomto náročném období poskytla.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Petra Blechy Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 10. 09. 2020

.....

Bc. Csaba Kartali



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>SPOLEHLIVOST JAKO SOUČÁST KVALITY</b> .....	<b>17</b>
2.1	Historie a definice spolehlivosti .....	18
2.2	Spolehlivost v širším a užším pojetí .....	19
2.3	Rozdělení spolehlivosti .....	21
<b>3</b>	<b>MATEMATICKÉ VYJÁDRĚNÍ SPOLEHLIVOSTI</b> .....	<b>25</b>
3.1	Rozdělení pravděpodobnosti diskrétních náhodných proměnných .....	26
3.1.1	Binomické rozdělení .....	26
3.1.2	Poissonovo rozdělení .....	28
3.2	Rozdělení pravděpodobnosti spojitých náhodných proměnných .....	28
3.2.1	Rovnoměrné rozdělení .....	28
3.2.2	Exponenciální rozdělení .....	29
3.2.3	Weibullovo rozdělení .....	30
3.2.4	Normální rozdělení .....	32
3.3	Typické charakteristiky náhodných proměnných .....	34
3.3.1	Distribuční funkce .....	34
3.3.2	Hustota pravděpodobnosti .....	35
3.3.3	Pravděpodobnostní funkce .....	36
3.3.4	Intenzita náhodného jevu .....	37
3.3.5	Střední hodnota, anebo charakteristika polohy .....	37
3.3.6	Variační rozpětí .....	38
3.3.7	Rozptyl .....	38
3.3.8	Směrodatná odchylka .....	39
<b>4</b>	<b>UKAZATELE SPOLEHLIVOSTI</b> .....	<b>41</b>
4.1	Vybrané ideální ukazatele spolehlivosti .....	41
4.1.1	Střední doba mezi poruchami .....	41
4.1.2	Střední doba provozu mezi poruchami .....	42
4.1.3	Střední doba provozu do poruchy .....	43
4.1.4	Pravděpodobnost bezporuchového provozu .....	43
4.1.5	Intenzita poruchy .....	44
4.2	Ukazatele spolehlivosti z praxe .....	45
4.2.1	FPY anebo správně napoprve a SCRAP .....	45
4.2.2	Vady na jednotku produktu a příležitost .....	46
4.2.3	Vady na milion příležitostí .....	46
4.2.4	Vady na milion jednotek .....	46
<b>5</b>	<b>PODSTATA ANALÝZY SPOLEHLIVOSTI</b> .....	<b>49</b>
5.1	Stanovení nákladovosti životních cyklů .....	51
5.2	Postup analýzy spolehlivosti .....	52
<b>6</b>	<b>METODY ANALÝZY SPOLEHLIVOSTI</b> .....	<b>55</b>
6.1	Analýza stromu poruch/poruchových stavů .....	56
6.2	Analýza způsobů a důsledků poruch FMEA .....	57
6.2.1	Rozdělení FMEA dle způsobu použití .....	58
6.2.2	Návaznosti mezi FMEA a další dokumentací .....	59
6.2.3	Postup provádění FMEA .....	61

<b>7</b>	<b>METODA SIX SIGMA .....</b>	<b>67</b>
7.1	Historie a principy metody Six Sigma.....	67
7.2	DMAIC.....	69
7.3	Nástroje metody Six Sigma.....	70
7.3.1	Pareto analýza .....	71
7.3.2	DOE, aneb plánování experimentů .....	72
<b>8</b>	<b>SYSTEMOVÝ ROZBOR PROBLEMATIKY.....</b>	<b>75</b>
8.1	Legislativní a normativní požadavky na průmyslové bezpečnostní přilby .....	75
8.2	Normativní požadavky na průmyslové bezpečnostní přilby .....	76
<b>9</b>	<b>NÁVRH A ZPŮSOB ŘEŠENÍ.....</b>	<b>79</b>
<b>10</b>	<b>ANALÝZA SPOLEHLIVOSTI PROCESU VÝROBY PRŮMYSLOVÝCH BEZPEČNOSTNÍCH PŘILEB .....</b>	<b>81</b>
10.1	Základní údaje o společnosti PLS s.r.o. ....	81
10.2	Popis současného procesu výroby přileb.....	82
10.3	Definice cílů procesu ohledně výkonnosti, kvality a spolehlivosti .....	84
10.4	Analýzy poruch pomocí Paretova grafu .....	86
10.5	Plán pro určení příčin poruch a definování nápravních opatření .....	87
10.6	DFMEA a PFMEA přilby a jejich zhodnocení .....	90
10.7	Zhodnocení procesu a přínosů metod po nápravních opatření .....	101
<b>11</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>103</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>105</b>
<b>13</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....</b>	<b>109</b>
13.1	Seznam tabulek.....	109
13.2	Seznam obrázků.....	109
13.3	Seznam zkratk.....	110

# 1 ÚVOD

Analýza spolehlivosti je jedním z hlavních nástrojů k zajištění kvality, bezpečnosti, spolehlivosti a jistě dohodnutých termínů dodávek, které zase udržují určité nehmotné faktory, jako je dobrá vůle zákazníka a pověst společnosti. Odstávka často vede ke hmotným i nehmotným ztrátám. Tyto ztráty mohou být způsobeny některými nespolehlivými subsystémy / komponentami, a proto je třeba vypracovat účinnou strategii pro minimalizace nebo eliminace variability a tím zajištění zvýšení spolehlivosti systémů a procesu samotného. Tyto změny a nápravní opatření mohou vést ke zlepšení údržby, oprav, popřípadě i ke konstrukčním změnám souvisejícími s těmito subsystémy a komponentami.

Systém je tvořen řadou komponent a / nebo subsystémů určených k dosažení společného konkrétního výsledku s přijatelnou úrovní spolehlivosti. Typ poruchy součásti a její frekvence má přímý vliv na spolehlivost systému. Proto je velmi důležité lokalizovat kritické komponenty a analyzovat jejich spolehlivost. Kromě toho je v mnoha situacích snazší a levnější testovat komponenty / subsystémy než celý systém.

Zmetky, přepracování a prostoje vedou k plýtvání, což může vést k dalším nákladům na produkty. Zisková marže může klesnout a tím se produkt stává méně konkurenceschopným na trhu, což může vést ke snížení tržního podílu. V extrémních případech může být nutné, aby společnost násilně snížila produkci nebo prodloužila dobu cyklu nebo procesu, aby dosáhla očekávané úrovně spolehlivosti a kvality, které nakonec zvyšují výrobní náklady. Na druhou stranu, problémy s kvalitou také zvyšují náklady, jejichž účinek je v souladu se ztrátou produktivity. Kromě toho, existuje pravděpodobnost ztráty dobré vůle zákazníka.

Potřeba analyzovat tyto problémy, zjistit hlavní příčinu nebo příčiny a lokalizovat kritické komponenty / subsystémy na základě jejich četnosti poruch může často nutit společnost, aby investovala do svých vlastních systémů a procesů. To lze obvykle provést vývojem modelů pro predikci spolehlivosti systému za účelem minimalizace očekávaných nákladů spojených se současnými nespolehlivými subsystémy a komponenty. Postoj těchto společností se může lišit v závislosti na jejich finančním a tržním podílu. V některých situacích investice do prozkoumání dostupných návrhových možností a odhad nákladových výhod zvážení změny designu může vést k velkému úspěchu.

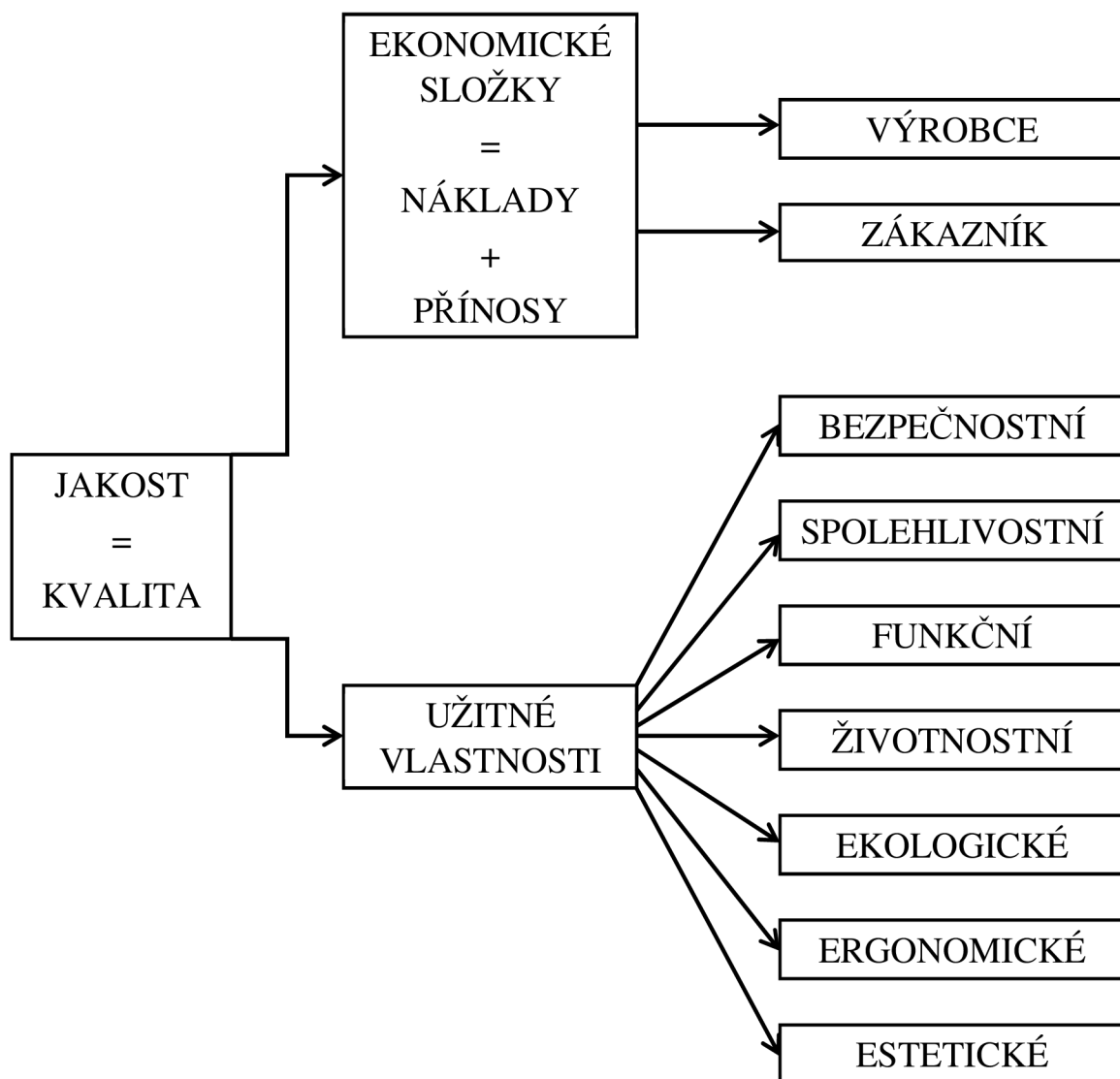
V současnosti je k dispozici spousta různých metod zajištění a zlepšení spolehlivosti, které obvykle spočívají v popisu současného stavu systému nebo procesu, následné analýze dat a návrhu nápravních opatření a akcí s cílem zlepšit současnou situaci.





## 2 SPOLEHLIVOST JAKO SOUČÁST KVALITY

Jakost nebo kvalitu výrobku je možné definovat určitými užitnými vlastnostmi a ekonomickými složkami nebo tzv. náklady. Ekonomické složky představují vlastně jednotlivé náklady a přínosy pro výrobce a zákazníka. Užitné vlastnosti se můžou formulovat pomocí důležitých kategorií těchto vlastností, které jsou často nazývány i jako „znaky kvality“ vyjmenované níže na obrázku 1 [1, 2]



Obr. 1) Určení jakosti pomocí užitných vlastností [1,2]

Znaky kvality můžeme z obecného hlediska rozdělit na kvantitativní a kvalitativní znaky, přičemž kvalitativní znaky lze rozdělit na ordinální a nominální. Kvantitativní, nebo taky nazývané kardinální znaky se charakterizují měřitelností, kde v případě spojitých znaků vyjadřují třeba výkon, nosnost, hmotnost, atd. = převážně fyzikální veličinu a v případě diskrétních znaků převážně vyjadřují počet charakteristických prvků z daného výběru.

Kvalitativní znaky se dají charakterizovat pomocí porovnání, kde pro ordinální, nebo tzv. uspořádatelné znaky platí, že mohou být stejné nebo rozdílné na dvou entitách, kde pro rozdílné lze určit právě porovnáním míry naplnění této charakteristiky a pomocí vhodné stupnice je možné jednotlivé entity uspořádat dle této míry, ale nelze určit velikost mezi nimi. Vhodným příkladem ordinálního znaku je například tvrdost materiálu. Pro nominální, nebo takzvané jmenné znaky platí, že je možno rozlišit shodnost nebo rozdílnost na různých entitách, ale nelze určit, o kolik se jejich hodnoty odlišují. Vhodným příkladem pro nominální znak je třeba druh materiálu. [1]

Každý tento znak pak lze rozdělit na určité ukazatele vztahující se k znaku, pomocí kterého jsme schopný popsat procesy a náhodné jevy. Jelikož se jedná o kvantifikovatelné vlastnosti, které se řídí teorií statistiky a ve velké míře pravděpodobností, v případě spolehlivostních znaků charakterizují právě spolehlivost objektů a jeho požadavky. [3]

## 2.1 Historie a definice spolehlivosti

V současnosti konkurenceschopnost zvýšila nároky na produkční systémy a tím i určila cíl a hlavní motiv, kde spokojenost zákazníků závisí na schopnosti výrobních systémů dodávat zboží a služby včas a splňovat požadované specifikace kvality. Aby se těchto cílů dosáhlo, je potřeba prvně docílit vysoké spolehlivosti výrobních systémů a produktů. Spolehlivost je populární koncept, který v podstatě určuje chvályhodný atribut osoby nebo produktu. Její skromný začátek byl v roce 1816, mnohem dříve, než by se dnes dalo odhadnout. Ve statistice se dá spolehlivost definovat jako konzistentnost množiny měření nebo měřicího přístroje, často používaného k popisu testu, přičemž nepřímo souvisí s náhodnou chybou. V psychologii spolehlivost odkazuje na soulad míry. Test se považuje za spolehlivý, pokud opakovaně dostáváme stejný výsledek. Například, pokud je test určen k měření typu osobnosti, kterým je například introvertnost, pak pokaždé, když je test podán subjektu, výsledky by měly být přibližně stejné. [4,5]

V devatenáctém a na počátku dvacátého století, komponenty byly v nižší míře omezeny vlivem nákladů, použití a vysokých výrobních nároků. V důsledku toho se v mnoha případech bylo dosaženo vysoké úrovně spolehlivosti pomocí předimenzování, jelikož pro danou technologickou vyspělost toho období to bylo nejvíce rozšířený způsob zajištění stálosti a spolehlivosti strojních zařízení a komponentů. Právě v tomto období se v zásadě potřeba analýzy spolehlivosti nepocítovala, ale během historického vývoje techniky a hlavně leteckého průmyslu, kde se pojem spolehlivost byl prvně užíván, se stala nedílnou součástí jak průmyslu, tak i lidského života. [1,4]

Před druhou světovou válkou tedy spolehlivost jako slovo vyjadřovalo jednoduše spolehlivost nebo opakovatelnost. Zpočátku to znamenalo, že od produktu se očekávalo jeho fungování dle míry potřeby. Jeho moderní použití bylo ve 40. letech 20. století americkou armádou předefinováno a vyvinulo se do současnosti. Současný význam představuje řadu dalších atributů, které pokrývají produkty, servisní aplikace, softwarové balíčky nebo lidskou činnost. Tyto atributy nyní prostupují všemi aspekty dnešního technologicky náročného světa. Raná aplikace spolehlivosti se vztahuje například k telegrafu. Jednalo se o systém poháněný

baterií s jednoduchými vysílači a přijímači připojenými drátem, kde hlavním poruchovým stavem mohl být přerušený vodič nebo nedostatečné napětí. V roce 1915 se na veřejnosti začaly objevovat rádia s několika elektronkami, které se v dané době považovali za velice spolehlivé. Od roku 1920 se začaly běžněji používat automobily, které představovali aplikace spolehlivosti složitých mechanických systémů. Ve 20. letech 20. století se začala i propagace zlepšování produktů pomocí statistické kontroly Shewhartem ve společnosti Bell Labs. Na paralelní cestě se spolehlivostí produktů byl vývoj statistiky ve dvacátém století. Statistika jako nástroj pro provádění měření se postupně stala neoddelitelnou součástí vývoje konceptů spolehlivosti. V tomto období byli designéři stále zodpovědní za spolehlivost a opraváři se o chyby postarali. Toto bylo způsobeno hlavně kvůli absencí plánované proaktivní prevence a taky kvůli chybějícím ekonomickým zdůvodněním. Postupně spousta pokroků bylo dosaženo ve 30. letech v několika konkrétních průmyslových odvětvích. Měření a kvantifikace kvality a procesu byla v plenkách, ale postupně rostla a rozšiřovala se. Během tohoto období Walodie Weibull pracoval ve Švédsku, přičemž zkoumal únavu materiálů. Během této doby vytvořil distribuci, kterou nyní nazýváme Weibullovo rozdělení a řadí se mezi největší průkopníky v oblasti spolehlivosti a statistiky. [4,5]

Nutnost vyjadřovat spolehlivost jako kvantitativní míru dosáhla jeho vrcholu před a na začátku druhé světové války, kde jeho kvantifikace byla za potřeby pro účel hodnocení obranných zařízení, zejména při cílů zvyšování spolehlivosti raketových střel, kde pro tyto účely byly použity základní koncepty spolehlivosti. [4]

V tomto období vznikla první definice pro spolehlivost, kterou lze jednoduše identifikovat jako "bezporuchovost", přičemž takto určená definice spolehlivost nevystihovala složité opravované systémy. V anglickém jazyku tato definice spolehlivosti byla spjatá s pojmem Reliability. První definice zní: "*Spolehlivost je pravděpodobnost, s jakou bude objekt schopen plnit bez poruchy požadovanou funkci po stanovenou dobu a v daných provozních podmínkách.*". [1,2]

Dle druhé definice spolehlivosti lze spolehlivost chápat jako obecnou vlastnost, která není omezená pouze na bezporuchovost, jak předešlá definice určuje, ale bere v potaz i dílčí vlastnosti, pro které byly určeny kvantitativní ukazatele. V anglickém jazyku pro takto definovanou spolehlivost se nadále používá pojem Reliability. Druhá definice spolehlivosti zní: "*Spolehlivost je obecná schopnost výrobku plnit požadované funkce po stanovenou dobu a v daných podmínkách, která se vyjadřuje dílčími vlastnostmi, jako jsou bezporuchovost, životnost, opravitelnost, apod.*". [1,2]

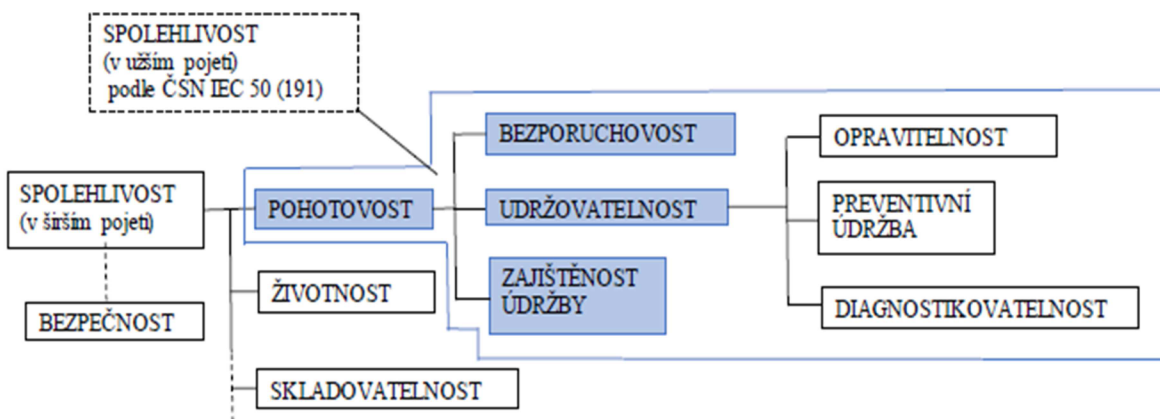
Třetí definice spolehlivosti, která je v anglickém jazyku označována jako dependability, zní: "*Spolehlivost je souhrnný termín používaný pro popis pohotovosti a činitelů, které ji ovlivňují: bezporuchovost, udržitelnost a zajištěnost údržby.*". [1,2]

## 2.2 Spolehlivost v širším a užším pojetí

Třetí definice spolehlivosti, která současně určuje v anglickém překladu slovo dependability, definována v normách ČSN EN ISO 9000:2015 a ČSN IEC 50(191):1993, naznačuje, že je

možné spolehlivost dle určitého dělení chápat jako pohotovost a jeho činitele, které na ni působí. Dle norem těchto norem je spolehlivost pojatá v užším pojetí. [1,2]

Spolehlivost v takzvaném širším pojetí vyjadřuje stabilitu užitečných vlastností (např. bezpečnostních, ekologických, ergonomických, atd.) objektu za stanovených podmínek a za určenou dobu užívání. Toto obecné vyjádření spolehlivosti v širším pojetí se taktéž skládá z dílčích vlastností, do kterých již patří výše zmíněné činitele pohotovosti, ale samotná pohotovost je doplněna vlastnostmi životnosti, skladovatelnosti a s dalšími činiteli samotné udržitelnosti jako opravitelnost, preventivní údržba a diagnostikovatelnost znázorněné na obrázku 2, který znázorňuje vztah spolehlivosti v užším a širším pojetí. [1,2]



Obr. 2) Spolehlivost v užším a širším pojetí [1]

Další významné pojmy spjaté se spolehlivostí jak v užším tak i v širším pojetí jsou popsány níže [1,2] :

- pohotovost je „schopnost objektu být ve stavu schopném plnit požadovanou funkci v daných podmínkách, v daném časovém okamžiku nebo v daném časovém intervalu, za předpokladu, že jsou zajištěny požadované vnější prostředky“, přičemž jako komplexní vlastnost zahrnuje jeho činitele popsány níže a vnějším prostředkem v uvedené definici se rozumí pouze prostředky údržby.
- bezporuchovost, v anglickém překladu reliability, vyjadřuje „schopnost objektu plnit nepřetržitě požadované funkce po stanovenou dobu a za stanovených podmínek“. Z hlediska stavu objektu se předpokládá, že na začátku časového intervalu je objekt ve schopném stavu pro plnění požadovaných funkcí a tento stav se ukončí, až nastane jev tzv. porucha.
- udržovatelnost je „schopnost objektu v daných podmínkách používání setrvat ve stavu nebo se vrátit do stavu, v němž může plnit požadovanou funkci tehdy, jestliže se údržba provádí v daných podmínkách a používají se stanovené postupy i prostředky“. Tato charakteristika úzce souvisí s pojmy jako diagnostikovatelnost, opravitelnost a preventivní údržba, jelikož se jedná o schopnost objektu pomocí prováděním údržby, a to pomocí nápravní či preventivní, být udržován ve stavu, ve kterém může vykonávat svou určenou funkci.

- zajištěnost údržby je „schopnost organizace poskytující údržbářské služby zajišťovat dle požadavků v daných podmínkách prostředky potřebné pro údržbu v souladu s danou koncepcí údržby. Tato definice vyjadřuje vlastnost údržbu zajišťující organizace zajistit veškeré potřebné prostředky jako třeba náradí, diagnostické prostředky, náhradní díly, kvalifikovaný personál, spotřební materiál, atd. podle předem určené koncepce údržby.
- bezpečnost je obecně chápána jako stav objektu, v němž při užívání jeho funkcí ke stanovenému účelu vzniká riziko poškození životního prostředí, majetku a zdraví osob, přičemž východiskem jejího zajištění je vymezení zdrojů, odpovědností a pravomocí, postupů, přezkoumávání a hodnocení jejích rizik s cílem snížení, regulování a eliminací těchto rizik a omezit ztráty požadované funkčnosti za stanovených podmínek a po stanovenou dobu obecně ztráty omezit na přijatelnou úroveň.
- životnost, anglicky durability, je „schopnost objektu plnit požadovanou funkci v daných podmínkách používání a údržby do dosažení mezního stavu“, přičemž o jeho ukončení rozhoduje mezní stav, při kterém je stav plnění požadovaných funkcí ukončen z technologických, bezpečnostních, ekonomických, technických či jiných závažných důvodů. Životnost se dále rozlišuje dle kritéria opravitelnosti, kde v případě opravovaných objektů se objekt po dosažení okamžiku mezního stavu na základě technických, technologických, ekonomických a bezpečnostních požadavků opravuje a v případě neopravovaných objektů je doba provozu do této první poruchy rovna dobou užitečného života objektu a již se neopravuje.
- skladovatelnost je „vlastnost objektu zachovávat si normální stav při stanovených podmínkách skladování a přepravy“ a vztahuje se pouze na období, kdy se od výrobku neočekává využití jeho funkčních vlastností.

### 2.3 Rozdělení spolehlivosti

Jak již bylo uvedeno, spolehlivost je jedna z nejvýznamnějších složek, které mají vliv na celkovou jakost objektu. I navzdory tomu, že spolehlivost je znakem kvality, který by se měl v ideálním případě vyjadřovat pomocí kvantitativních znaků, v průmyslové praxi se to zřídka stává realitou. [6,7]

Prvním důvodem pro absenci identifikace spolehlivosti pomocí kvantitativních znaků je, že v praxi chybí personál ovládající teoretickou a technickou znalost pro efektivní řízení spolehlivosti a velmi omezeně se provádějí určovací a ověřovací laboratorní zkoušky. Druhotným důvodem je, že ne vždycky dokáže podnik rozeznat a určit faktory vedoucí ke spolehlivosti objektu. Jelikož spolehlivost se identifikuje jako kvalita v čase, tak je očekáváno, že objekt bude spolehlivě vykonávat jeho funkci po celý čas jeho životnosti, tzv. během celého životního cyklu, přičemž nároky na údržbu budou minimální. Složky pohotovosti, a tím i vlastně spolehlivosti zařízení, ovlivnitelné údržbou jsou opravitelnost a bezporuchovost. [6,7]

V případě bezporuchovosti u neopravovaných objektů je nelze prakticky údržbou ovlivnit, ale v případě opravovaných objektů lze pomocí výběru vhodného modelu údržby, převážně prediktivní údržbou, předejít poruchám, které vznikají důvodem opotřebení. Plánovaná preventivní údržba jednak převede způsob selhání z náhlé ztráty funkceschopnosti na plánovanou ztrátu funkceschopnosti objektu, přičemž minimalizuje ztráty způsobené postojem. Na druhou stranu se často nepočítá, že předem určený počet zásahů v případě plánované preventivní údržby může být mnohem vyšší, než v případě údržby vyvolanou náhlou ztrátou funkceschopnosti, což může generovat vícenáklady a být doprovázeno dalšími negativními jevy vyjmenovanými níže [7]:

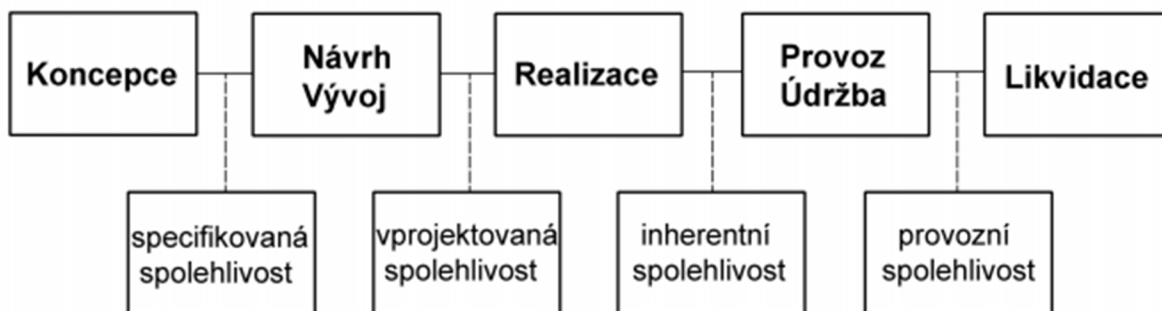
- zvýšení poruchovosti v případě vyměňovaných součástí vlivem vyšší počáteční intenzity poruch,
- vyšší pravděpodobnost chybovosti během údržby vlivem lidského faktoru.

Jen opravované objekty jsou ovlivnitelné a to především výběrem vhodného modelu údržby a vhodné organizovanosti údržby, přičemž cílem je minimalizace dob, které jsou spojené s údržbou a zajištěním údržby vyjmenované níže [7]:

- logistické zpoždění
- technické zpoždění
- doba preventivní údržby
- doba lokalizace porouchané části
- doba aktivní opravy (po poruše)
- doba kontroly

Terciálním a docela častým důvodem je, že vedle vysoké finanční nákladovosti a časové náročnosti se neurčují správně v základní fázi životního cyklu zákaznické a tržní požadavky na spolehlivost. Vlastně jedná se o to, že nejsou známy veškeré požadavky zákazníka pro verifikaci splnění požadavků, nebo není správně určená spolehlivost vůči konkurenci. [6,7]

Používání spolehlivosti, jako pojmu pro vyjádření jakosti v čase, je často doprovázeno přívlastky, přičemž tímto způsobem vzniklé pojmy převážně nejsou určeny v normách. Na obrázku 3 níže je schéma pro popis dílčích typů spolehlivostí vstupujících do etap životního cyklu objektů [1,2]:



Obr. 3) Spolehlivost v etapách životního cyklu [1,2]

Níže popsané pojmy a jejich objasnění je proto důležité pro technickou praxi [1,2]:

- Specifikovaná spolehlivost - je vlastně vymezením spolehlivosti s hlavním důrazem na požadavky určené převážně zákazníkem nebo daným trhem pro objekt včetně všech charakteristických podmínek.
- Vprojektovaná spolehlivost - určuje spolehlivost, se kterým se počítá jako vstup do návrhu daného projektu.
- Odhadovaná spolehlivost - jinak nazýváno predikovaná spolehlivost, která úzce souvisí se spolehlivostí v každé etapě životního cyklu. Je výsledkem analýz, výpočtů a prognóz spolehlivosti projektovaných objektů. Je tedy výsledkem použitých metod odhadu spolehlivosti, použitého výpočtového modelu spolehlivosti systému, vstupních dat o spolehlivosti prvků, schopností a dovedností analytika provádějícího odhad.
- Inherentní spolehlivost - je spolehlivost spjatá s vlastností objektu "vložená" v průběhu jeho návrhu a výroby. Nezahrnuje zhoršující vlivy podmínek provozu, prostředí a údržby a také nezohledňuje lidský faktor a užívání zákazníkem.
- Provozní spolehlivost - je spolehlivostí, při kterém se uvažují tzv. zhoršující vlivy užívání, podmínek provozu, prostředí a údržby a má na něj vliv lidského faktoru.





### 3 MATEMATICKÉ VYJÁDŘENÍ SPOLEHLIVOSTI

Pro popis náhodných jevů a procesů jsou obecně určeny ukazatele, které je pomocí statistiky a pravděpodobnosti určují. Obzvláště v případě spolehlivostních ukazatelů, pomocí kterých dokážeme vyjádřit spolehlivostní charakteristiky objektů ve kvantifikovatelné formě, případně určit požadavky na ně je volba jednotlivých ukazatelů velice důležitá. [3]

Dané ukazatele, v případě určení spolehlivosti jsou tzv. nástrojem, pomocí kterého jsme schopný popsat stochastické jevy a procesy. Je možné je dělit na dva druhy vyjmenované níže: [3]

- funkci používanou pro popis náhodného procesu nebo proměnné,
- číselnou hodnotu používanou pro popis náhodného jevu nebo proměnné.

Pro přiblížení těchto funkcí a číselných hodnot je nejdříve potřeba určit některé terminologie potřebné pro vysvětlení ukazatelů:

Prvně je potřeba určit náhodný pokus a náhodný jev. Náhodným pokusem rozumíme teda každý definitivní děj, který se může nekonečně mnohokrát opakovat a realizovat za daných a jasně určených podmínek. Náhodným jev zase můžeme chápat jako libovolné tvrzení definitivně rozhodující o pravdivosti či nepravdivosti výsledku náhodného pokusu, určen úplnou množinou elementárních jevů nejrůznějších charakterů. [3]

Rozdělit můžeme čtyři druhy jevů [8]:

- **Jistý jev** – nastane vždy při zachování jasně daných podmínek i při opakování pokusů. Pravděpodobnost takového jevu je vždy rovna jedné:  $P(A) = 1$ .
- **Náhodný jev** – nastat může, ale i nemusí právě v závislosti na náhodě, i když jsou podmínky při realizaci zachované při opakování a můžeme říct, že jev nastane s určitou pravděpodobností, která může být konstanta či proměnná. Pravděpodobnost, že nastane náhodný jev, je možné popsat intervalem:  $0 \leq P(A) \leq 1$ .
- **Nemožný jev** – nemůže nastat i při opakování realizace pokusů, když jsou zachované stejné podmínky. Pravděpodobnost nemožného jevu je roven nule:  $P(A) = 0$ .
- **Chaotický jev** – nelze určit pravděpodobnost jeho výskytu a taky nelze kategorizovat mezi výše zmíněné typy jevů.

Dále je náhodná proměnná, která je taková proměnná, u které každá jeho hodnota je jasně stanovena výsledkem náhodného experimentu a zároveň která s danou pravděpodobností nabyde libovolné hodnoty z přesně určeného oboru hodnot, přičemž tato pravděpodobnost se dá formulovat pomocí jistého zákona rozdělení pravděpodobnosti. Náhodná proměnná se z pravidla označuje velkými písmeny ( $Z, Y, X, \dots$ ) a jejich možné hodnoty nabytí se značí odpovídajícími malými písmeny ( $z, y, x, \dots$ ). [3]

Pro vyjádření těchto náhodných proměnných či veličin v číselné formě, který je velice užitečný pro popis ukazatelů spolehlivosti, je potřeba volit vhodný a měřitelný typ veličiny,

např. počet cyklů do poruchy, velikost kumulativní síly do lomu apod. K popisu těchto veličin můžeme použít následující pojmy a z teorie pravděpodobnosti a matematické statistiky [8]:

- $P(A)$  – označuje pravděpodobnost, že jev  $A$  nastane,
- $F(t)$  – označuje distribuční funkci pravděpodobnosti náhodné proměnné  $t$ ,
- $f(t)$  – označuje hustotu pravděpodobnosti náhodné proměnné  $t$ ,
- $E(t)$  – označuje očekávanou hodnotu, nazývanou střední hodnotou náhodné proměnné  $t$ .
- $D(t)$  – označuje rozptyl a vyjadřuje variabilitu rozdělení souboru náhodných proměnných  $t$  kolem střední hodnoty

U každé náhodné proměnné je s ní spjaté určité pravidlo, které definuje, s jakou pravděpodobností nastane daný jev během náhodného pokusu, který se nazývá zákonem rozdělení pravděpodobnosti náhodné proměnné a může se odlišně vyjadřovat pro spojité náhodné proměnné, kde se např. vyjadřuje pomocí distribuční funkce, intenzity náhodného jevu, hustoty pravděpodobnosti a v případě diskrétní náhodné proměnné pomocí distribuční funkce nebo pravděpodobnostní funkce. [3]

Často tyto informace, které náhodnou proměnnou pomocí zákona rozdělení charakterizují a podávají úplný obraz, jsou složité, nepřehledné a ne vždycky praktické, a proto je v některých případech slučujeme do jednoho nebo několika čísel, které tuto proměnnou definují předem daným výpočtem. Tyto čísla nazýváme statistikami, nebo tzv. číselnými charakteristikami, kterých je nespočet, ale v praxi se nejvíc používají právě pro určení hlavních charakteristik každého rozdělení, čímž jsou poloha a variabilita náhodné proměnné vyjmenované níže: [3]

Doplňkovou, ale taky velmi častou charakteristikou náhodné proměnné je tzv. kvantil, který rozděluje obor hodnot náhodné proměnné v daném pravděpodobnostním poměru. Určité kvantily mají pro statistiku zvláštní význam, například 50% kvantil, tzv. medián ( $x_{0,5}$ ), který rozděluje statistický soubor na dvě poloviny se stejným počtem. [3,9]

Rozdělení pravděpodobnosti náhodných proměnných lze především rozdělit na dvě základní skupiny dle typu proměnné a to pro diskrétní náhodné proměnné a pro spojité náhodné proměnné.

### **3.1 Rozdělení pravděpodobnosti diskrétních náhodných proměnných**

Mezi typické rozdělení pravděpodobnosti diskrétních náhodných proměnných patří Binomické rozdělení a Poissonovo rozdělení. [11]

#### **3.1.1 Binomické rozdělení**

Binomické rozdělení je definováno pro diskrétní náhodné jevy, při kterých náhodná veličina  $X$  určuje počet výskytu jevů v počtu  $n$  Bernoulliho pokusech, přičemž pravděpodobnost výskytu

jevu  $P$  je konstantní v každém pokusu a mohou nastat jen 2 výsledky pokusu. Binomické rozdělení je charakterizováno následujícím popisem: [10,11]

$$X \rightarrow Bi(n, p) \quad (1)$$

a je určeno parametry: [10,11]

$n$  – definitivní počet Bernoulliho pokusů = v případě popisu procesů lze to charakterizovat jako rozsah výběru,

$p$  – pravděpodobnost, že nastane daný jev, tzv. úspěch = v případě popisu procesů lze to charakterizovat jako podíl neshodných jednotek

V případě diskrétních náhodných proměnných se místo hustoty pravděpodobnosti používá právě pravděpodobnostní funkce  $P(X)$  pro jejich vyjádření, následovně: [10,11]

$$P(X = x) = \binom{n}{x} p^x (1 - p)^{n-x} \quad (2)$$

Jeho střední hodnota a rozptyl má následující tvar: [10,11]

Střední hodnota:  $EX = n * p \quad (3)$

Rozptyl:  $DX = n * p * (1 - p) \quad (4)$

Ve statistické regulaci procesu srovnáváním se používá binomické rozdělení pravděpodobnosti při regulačních diagramech pro počet neshodných jednotek ( $np$ ) a pro podíl neshodných jednotek. V případě, že  $n$  je konstantní je vhodné aplikovat statistickou regulaci pro počet neshodných jednotek. V případě, kdy nelze zajistit konstantní rozsah výběru je vhodné použít statistickou regulaci pro podíl neshodných jednotek ( $p$ ). Obecně pro ně platí předpoklad, že základní soubor, ze kterého se provádí výběr dílčích výběrů, má procento neshodných jednotek roven  $p$  a rozsah dílčích výběrů je roven  $n$ . [10]

Za předpokladu podmínky: [9]

$$n * \bar{p} * (1 - \bar{p}) \geq 9 ; \quad (5)$$

Lze binomické rozdělení pravděpodobnosti  $Bi(n, p)$  aproximovat normálním rozdělením  $N(\overline{np}, \overline{np}(1 - \bar{p}))$  pravděpodobnosti pro určení regulačních diagramů. Platí to v případě dostatečně velkých výběrů  $n$ . Binomické rozdělení je obecně asymetrické ale růstem výběru  $n$ , nebo přibližováním  $p$  k hodnotě  $0,5$  se postupně stává symetričtější. [10,11]

### 3.1.2 Poissonovo rozdělení

Poissonovo rozdělení popisuje speciální případ bodového procesu. Určuje náhodný jev jako Poissonův proces, pro který je charakteristické, že rychlost nebo hustota výskytu toho jevu je konstantní, kde tato konstantnost platí na celý časový interval, nebo na vymezenou plochu. Poissonův proces lze chápat jako nezávislý děj v čase  $t$  při rychlosti výskytu děje  $\lambda$ , nebo jako nezávislý děj vyskytující se na ploše  $t$  při hustotě výskytu děje  $\lambda$ . [10,11]

Toto rozdělení jednoduše popisuje počet událostí s úspěchem za časový interval  $t$ , popřípadě počet výskytů s úspěchem na ploše  $t$ . Vyjadřuje počet výskytů málo pravděpodobných, řídkých jevů v určitém časovém, resp. objemovém intervalu a značí se: [10,11]

$$X \rightarrow Po(\lambda t) ; \quad (6)$$

Jeho pravděpodobnostní funkci lze popsat, dle vzorce níže: [11]

$$P(X = x) = \frac{\lambda t^x}{x!} * e^{-\lambda t} ;$$

Kde: [11] (7)

- $t$  vyjadřuje časový interval nebo plochu,
- $\lambda$  představuje průměrný počet neshod na jeden produkt.

Jeho střední hodnota a rozptyl je roven taktéž stejné hodnoty: [11]

$$EX = DX = \lambda t \quad (8)$$

Ve statistické regulaci procesu srovnáváním se používá Poissonovo rozdělení pravděpodobnosti při regulačních diagramech pro počet neshod ( $z$ ) a pro počet neshod na jednotku ( $u$ ). [10]

## 3.2 Rozdělení pravděpodobnosti spojitých náhodných proměnných

Mezi typické rozdělení pravděpodobnosti spojitých náhodných proměnných patří rovnoměrné, exponenciální, Weibullovo a normální rozdělení. [13]

### 3.2.1 Rovnoměrné rozdělení

Při rovnoměrném rozdělení je hustota pravděpodobnosti na určitém intervalu roven konstantní hodnoty a na všech ostatních bodech mimo tento interval roven nule. Rovnoměrné rozdělení se značí: [13]

$$X \rightarrow Po(\lambda t) \quad (9)$$

Jeho hustota pravděpodobnosti je popsána níže: [13]

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{pro } x \in \langle a, b \rangle \\ 0 & \text{pro } \textit{mimo } \langle a, b \rangle \end{cases} \quad (10)$$

Jeho distribuční funkce je popsáno následovně: [13]

$$F(X) = \begin{cases} 0 & \text{pro } x \in (-\infty, a) \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{pro } x \in \langle a, b \rangle \\ 1 & \text{pro } x \in (b, \infty) \end{cases} \quad (11)$$

Jeho střední hodnota má tvar: [13]

$$EX = \frac{a+b}{2}, \quad (12)$$

A jeho rozptyl je vyjádřen pomocí vzorce níže: [13]

$$DX = \frac{(a-b)^2}{12}, \quad (13)$$

### 3.2.2 Exponenciální rozdělení

Exponenciální rozdělení je z pravidla přidruženým rozdělením k Poissonovému rozdělení, kde Poissonovo rozdělení popisuje počet událostí v určitém intervalu (ploše) a exponenciální rozdělení na druhou stranu popisuje dobu mezi výskyty těchto událostí. Značí se popisem níže: [13]

$$X \rightarrow E(A, \lambda) \quad (14)$$

Jeho hustota pravděpodobnosti má následující tvar: [13]

$$f(t) = \lambda * e^{-\lambda*(t-A)} ; \lambda > 0; t > A; A \in \mathbb{R} \quad (15)$$

kde

- $\lambda$  je intenzita poruch náhodné veličiny s exponenciálním rozdělením a je větší než 0 a také konstantní,
- $A$  je takzvaný “parameter posunutí” rozdělení na ose  $x$ .

V případě  $A=0$  můžeme veličinu  $X$ , která má exponenciální rozdělení, popsat následovně: [13]

$$X \rightarrow E(\lambda) \quad (16)$$

V tomto případě lze hustotu pravděpodobnosti vyjádřit následovně: [13]

$$f(t) = \lambda * e^{-\lambda * (t)}; \quad \lambda > 0; t > 0; \quad (17)$$

A distribuční funkce má tvar: [13]

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda * (t)}; \quad \lambda > 0; t > 0; \quad (18)$$

Jeho střední hodnota a rozptyl mají následující tvar: [13]

$$EX = \frac{1}{\lambda}; \quad (19)$$

a

$$DX = \frac{1}{\lambda^2}; \quad (20)$$

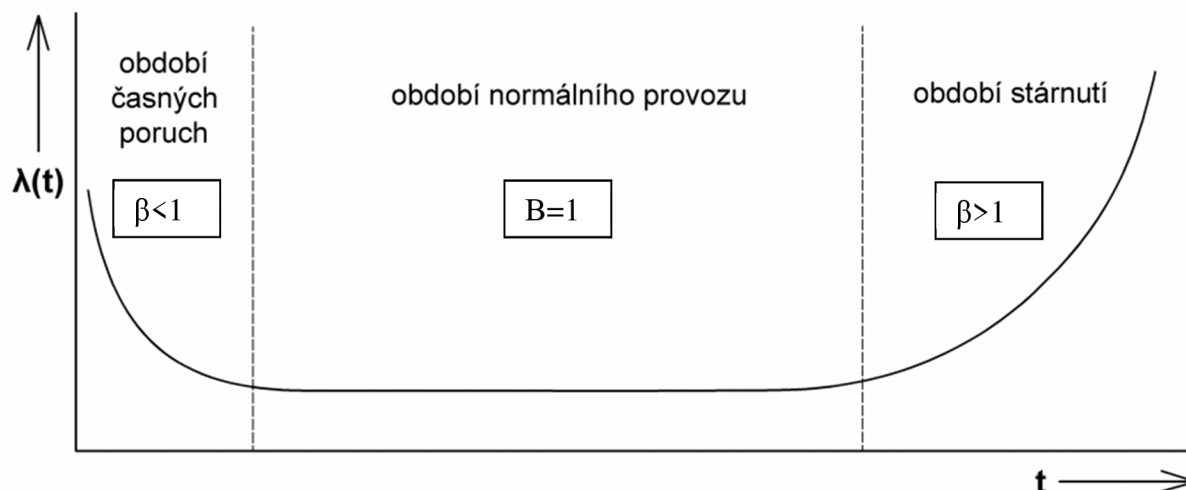
Exponenciální rozdělení v technické praxi vhodně popisuje rozdělení doby života u zařízení, kde nedochází k poruše těchto objektů v důsledku únavy nebo mechanického, či jiného opotřebení, ale jinou náhodnou příčinou. Toto rozdělení se mnohdy nazývá i jako rozdělení bez paměti, jelikož při jeho výskytu informace o tom, že daný jev nenastal po dobu  $t1$  nijak nemění pravděpodobnost výskytu jevu v období  $t2$ . [13]

### 3.2.3 Weibullovo rozdělení

Weibullovo rozdělení je díky jeho parametru  $\beta$  velice flexibilním rozdělením pro modelování pravděpodobnosti náhodných proměnných v případě typické vanové křivky, který ve většině případů se používá pro popis spojitých náhodných proměnných, charakterizujících dobu do poruchy objektů. Toto rozdělení se převážně aplikuje u objektů či komponent, u kterých se předpokládá mechanické opotřebení nebo únava materiálu v případech ranních poruch funkčního života objektů, ale i v období na konci životního cyklu objektů, zejména vlivem stárnutí. [13]

Toto rozdělení se obecně může dělit na 3 typy na základě míry zobecnění. V základní podobě je Weibullovo rozdělení tříparametrové, ale jeho varianty existují na základě zjednodušení na dvou- či jednoparametrové rozdělení. Tříparametrová forma Weibullovo rozdělení je charakterizováno již zmíněným parametrem tvaru  $\beta$ , parametrem měřítka  $\eta$  a parametrem umístění nebo polohy  $\gamma$ . [14]

Lze říct, že parametr umístění  $\gamma$  udává minimální dobu, po které daný děj (převážně porucha) může nastat. Parametr měřítka  $\eta$  určuje roztažení rozdělení na časové ose, například z měsíců na hodiny, čímž nemění aktuální tvar rozdělení, pouze změní jeho měřítko. Jak již název parametru měřítka naznačuje, tento parametr vyjadřuje závislosti materiálu, namáhání a podmínek užívání objektu. Finální, ale převážně nejdůležitější parametr tvaru  $\beta$ , na kterém závisí tvar intenzity poruch, a tím vlastně i vhodnost pro aproximaci dané etapy životního cyklu objektu v rámci vanové křivky jak znázorněno na obrázku 4. [13,14]



Obr. 4) Weibullovo rozdělení aproximující vanovou křivku [15]

V případě že parametr umístění  $\gamma$  je roven nule, tak Weibullovo rozdělení z tříparametrové varianty se stává dvouparametrovým. V případě že parametr umístění  $\gamma$  je roven nule a parametr tvaru  $\beta$  je konstantou, tak tříparametrové rozdělení se stane jednoparametrovým. [14]

Typickým příkladem Weibullovo rozdělení je dvouparametrové rozdělení, kde rozdělení se značí následovně: [13]

$$X \rightarrow W(\eta, \beta) \quad (21)$$

Jeho hustota pravděpodobnosti je vyjádřena následovně: [13]

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} * \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} * e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}; \quad \eta > 0; t > 0; \beta > 0 \quad (22)$$

Distribuční funkce v tom případě je: [13]

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}; \quad \eta > 0; t > 0; \beta > 0 \quad (23)$$

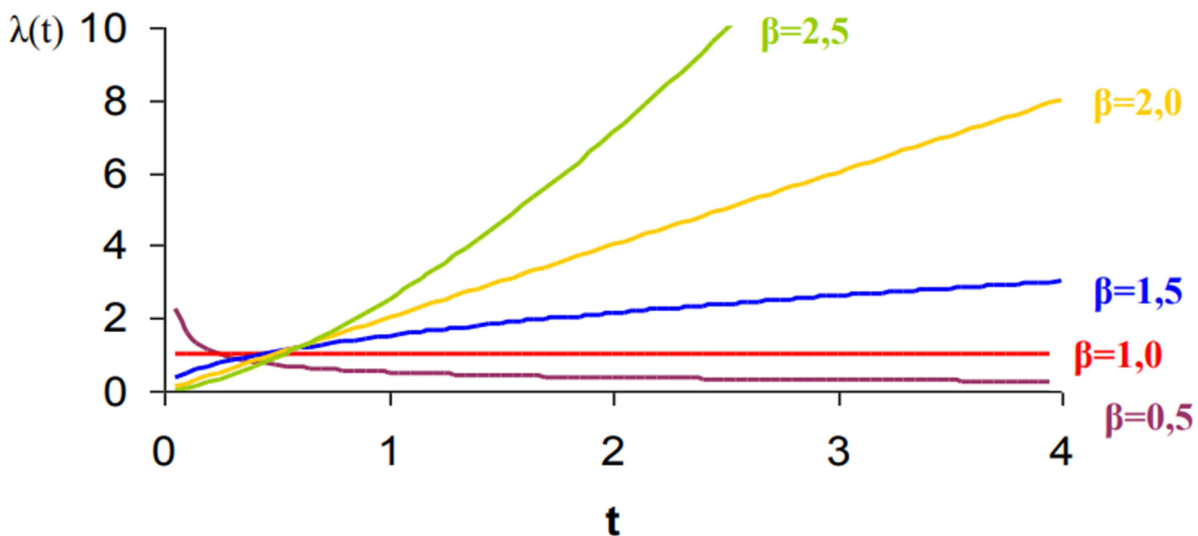
Intenzita poruch má tvar: [13]

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} * \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}; \quad \eta > 0; t > 0; \beta > 0 \quad (24)$$

Z čeho lze odvodit, že

$$\lambda(t) = \text{konst.} * t^{\beta-1}; \quad \eta > 0; t > 0; \beta > 0 \quad (25)$$

Proto tvar intenzity poruch je závislý pouze na parametru tvaru  $\beta$ , jak je to znázorněno na obrázku 5. [13]



Obr. 5) Závislost Weibullovo rozdělení na parametru tvaru  $\beta$  při  $\eta=1$  [13]

### 3.2.4 Normální rozdělení

Normální rozdělení je jedním z nejdůležitějších rozdělení pravděpodobnosti náhodných proměnných popisujících značnou škálu různých náhodných jevů v technické praxi, ekonomice a v přírodě. Normální rozdělení je nejvhodnější použít, když pravděpodobnost náhodné proměnné je ovlivněn různými a vzájemně nezávislými vlivy a pomocí něj je možné aproximovat taky skupinu dalších diskrétních a spojitých rozdělení při předem daných podmínkách. [12,13]

Normální rozdělení má následovné značení: [12,13]

$$X \rightarrow N(\mu, \sigma^2) \quad (26)$$

A je určen následujícími parametry: [13]

- $\mu$  – vyjadřuje střední hodnotu, přičemž určuje polohu daného rozdělení;
- $\sigma^2$  – vyjadřuje rozptyl, určující rozptýlení hodnot kolem střední hodnoty  $\mu$ .

V určité anglosaské literatuře se normální rozdělení charakterizuje podobným párem parametrů, kde ale rozptyl  $\sigma^2$  obvykle nahrazuje směrodatná odchylka  $\sigma$ . [13]



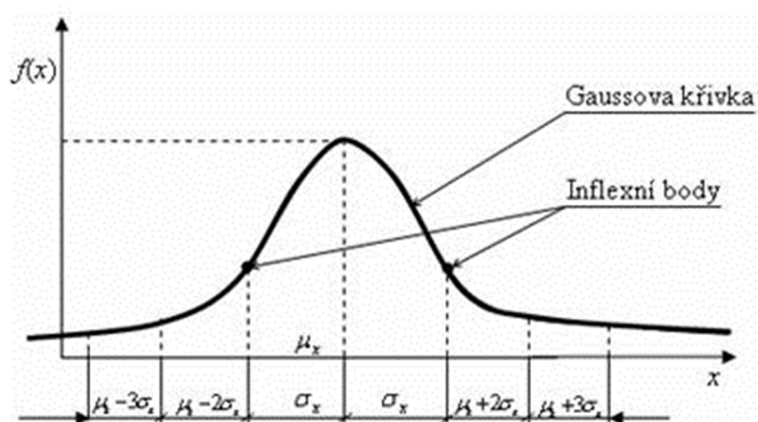
Hustota pravděpodobnosti pro normální rozdělení má obecně následující tvar: [13]

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2}; \quad \text{pro } -\infty < x < \infty \quad (27)$$

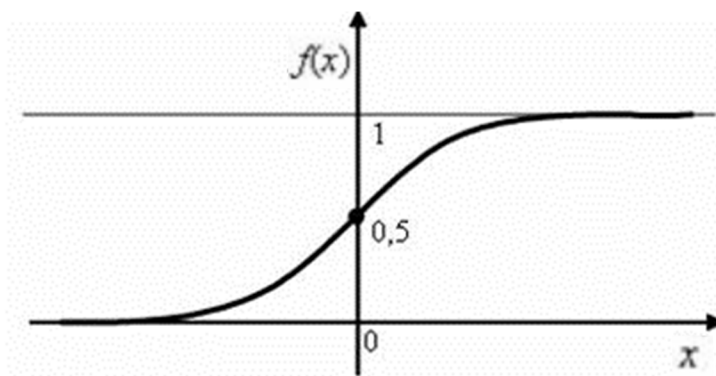
A jeho distribuční funkce má tvar: [13]

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} * \int_{-\infty}^x e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2} dt; \quad (28)$$

Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce normálního rozdělení jsou znázorněny na obrázcích 6. a 7. [16]



Obr. 6) Hustota pravděpodobnosti pro obecné normální rozdělení [16]



Obr. 7) Distribuční funkce pro normální rozdělení [16]

Střední hodnota normálního rozdělení je vyjádřena následovně: [13]

$$EX = \mu; \quad - \text{střední hodnota základního souboru} \quad (29)$$

Rozptyl normálního rozdělení je vyjádřen níže: [13]

$$DX = \sigma^2; \quad - \text{rozptyl základního souboru} \quad (30)$$

V případě, že střední hodnota je rovna nule  $\mu=0$  a směrodatná odchylka je rovna jedné  $\sigma=1$ , lze říct, že dané normální rozdělení je normované. Pomocí normovaného normálního rozdělení lze vypočítat jeho distribuční funkci, které je určeno v tabulkách. [12,13]

Tento speciální případ normálního rozdělení se značí následovně: [12,13]

$$Z \rightarrow N(0,1), \quad (31)$$

Přičemž se jeho distribuční funkce  $\Phi(x)$  a hustota pravděpodobnosti  $\varphi(x)$  se taky značí speciálně, kde

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{x^2}{2}}; \quad \text{pro } -\infty < x < \infty \quad (32)$$

a

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt; \quad (33)$$

přičemž střední hodnota je rovna nule: [12,13]

$$EX = 0; \quad (34)$$

a rozptyl je roven jedné: [12,13]

$$DX = 1; \quad (35)$$

V technologické praxi při statistické regulaci se normální rozdělení používá nejvíc a je i předpokladem pro možnost statistické regulace měřením. [12]

### 3.3 Typické charakteristiky náhodných proměnných

Při práci s náhodnými proměnnými je potřeba zacházet dle pravidel, které určují zákonitost, podle kterých můžeme určité pravděpodobnosti přiřazovat k náhodným proměnným. Toto nám udává, s jakou pravděpodobností můžeme očekávat určitý výsledek daného pokusu nebo testu. V případě, že tyto vztahy mezi pravděpodobnostmi a určitými jevy známe, tak tomu říkáme, že je dán zákon rozdělení pravděpodobnosti v případě náhodné proměnné. [3]

#### 3.3.1 Distribuční funkce

Táto charakteristika je nejzákladnější a platná pro diskrétní i spojitou náhodnou proměnnou. Distribuční funkci  $F(x_i)$  lze definovat jako pravděpodobnost, že náhodná veličina (proměnná  $X$ ) nabude hodnoty menší nebo rovné než určitá hodnota  $x$ . [3,9]

Distribuční funkce  $F(x_i)$  je tedy vždy přiřazena ke konkrétní hodnotě náhodné veličiny  $x_i$ , a jelikož je určená na oboru reálných čísel  $x$  od  $-\infty$  do  $+\infty$ , tak pro tyto reálná čísla pak distribuční funkce  $F(x_i)$  může nabývat hodnot v intervalu  $<0; +1>$  a je definovaná vztahem: [3,9]

$$F(x_i) = P(X < x_i) \quad (36)$$

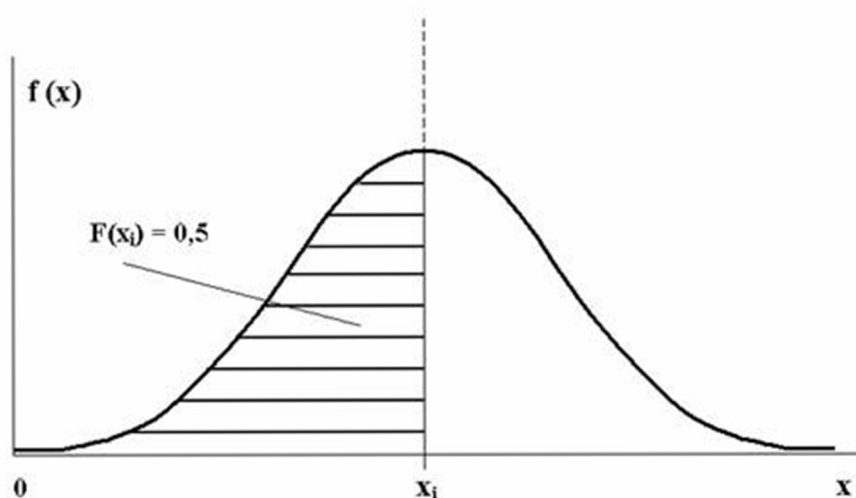
a dále platí pro něj, že: [3]

- distribuční funkce  $F(x_i)$  je neklesající funkce,
- distribuční funkce  $F(x_i)$  je spojitá zleva,
- $F(-\infty) = 0$ , jelikož pravděpodobnost  $P(X < -\infty)$  je nemožná,
- $F(+\infty) = 1$ , jelikož pravděpodobnost  $P(X < -\infty)$  je jistá.

Pro diskrétní náhodnou proměnnou platí, že jeho distribuční funkce  $F(x)$  vychází z jeho pravděpodobností funkce  $P(X=x_i)=P(x_i)$ : [9]

$$F(x) = \sum_{x_i < x} P(X = x_i) \quad (37)$$

Distribuční funkce  $F(x_i)$  se vyjadřuje graficky jako plocha pod křivkou pravděpodobnostního rozdělení ohraničená v hodnotě  $x_i$ , znázorněno na obrázku 8. [9]



Obr. 8) Distribuční funkce v grafické podobě [9]

### 3.3.2 Hustota pravděpodobnosti

Táto charakteristika náhodné proměnné je tzv. rozdělení spojitého typu, kde platí reálný a nezáporný vztah pro hustotu pravděpodobnosti náhodné proměnné  $f(x)$  [3]:

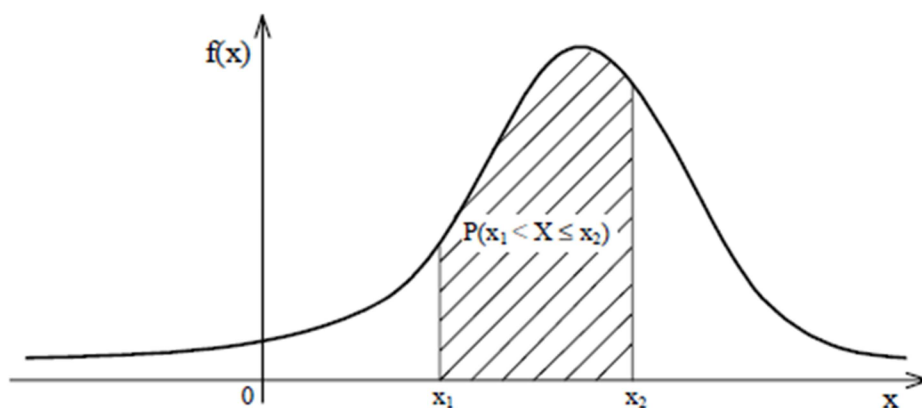
$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}; \quad (38)$$

přičemž jeho distribuční funkce  $F(x)$  se vyjadřuje: [3]

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(u) * du ; \quad (39)$$

a zároveň platí pro ně vlastnosti: [3]

- $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) * dx = 1$ ;
- $P(x_1 < X \leq x_2) = F(x_2) - F(x_1) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) * dx$ , pro  $\forall x \in \mathbb{R}$  a  $x_1 < x_2$  ;
- $P(X = x) = 0$ .



Obr. 9) Graf znázorňující hustotu pravděpodobnosti náhodné veličiny [3]

### 3.3.3 Pravděpodobnostní funkce

Pravděpodobnostní funkce  $P(x_i) = P(X = x_i)$  je typická pro diskrétní náhodné proměnné a charakterizuje tzv. rozdělení diskrétního typu a může být definovaná pomocí grafu, tabulky, vzorce nebo jiným vhodným způsobem předpisu. [3]

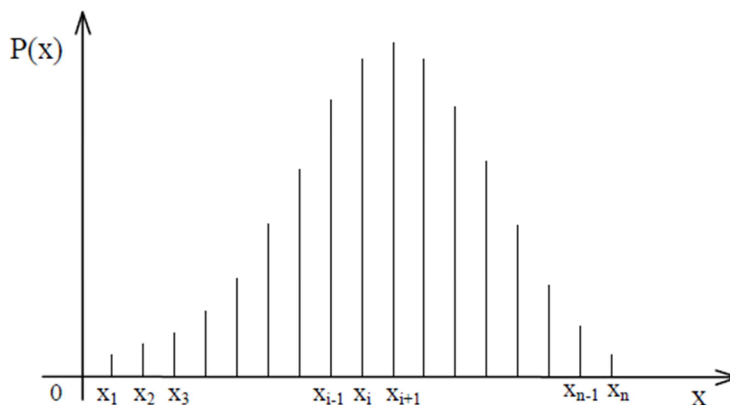
Platí pro něj, že v případě, když náhodná proměnná  $X$  má diskrétní rozdělení, tak existuje konečná, nebo uzavřená množina reálných čísel  $x_i = \langle x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \rangle$ , přičemž ke každé  $x_i$  je přiřazená pravděpodobnost větší než nula: [3]

$$P(X = x_i) > 0; \quad (40)$$

a také platí, že součet všech pravděpodobností přiřazených k množině  $x_i$  je roven jedna: [3]

$$\sum P(X = x_i) = 1; \quad (41)$$

přičemž graf pravděpodobnostní funkce  $P(x_i)$  dává podobnou informaci grafu hustoty pravděpodobnosti  $f(x)$ : [3]



Obr. 10) Pravděpodobnostní funkce pro diskrétní náhodnou proměnnou [3]

### 3.3.4 Intenzita náhodného jevu

Intenzita náhodného jevu  $h(x_i)$  charakterizuje podmíněnou pravděpodobnost jevu nastávajícího za nekonečně malý interval  $dx$ , když tento jev již nenastal do okamžiku  $x$  a na základě hodnoty náhodného jevu může být proměnná nebo konstantní. [3]

Intenzita náhodného jevu v tomto případě může být vyjádřena vztahem: [3]

$$h(x) = \frac{f(x)}{1 - F(x)} ; \quad (42)$$

### 3.3.5 Střední hodnota, anebo charakteristika polohy

Mezi hlavní charakteristiky náhodných proměnných patří v první řadě již výše zmíněná střední hodnota  $E(X)$ , anglicky Expected Value, která udává klíčovou vlastnost náhodné proměnné, a to její polohu. [3,9]

Střední hodnota  $E(X)$  pro diskrétní náhodnou proměnnou  $X$  se definuje pomocí funkce pravděpodobnosti dle vztahu níže: [3]

$$E(X) = \mu = \sum x * P(x) ; \quad (43)$$

Střední hodnota  $E(x)$  pro spojitou náhodnou proměnnou  $X$  se definuje pomocí hustoty pravděpodobnosti  $f(x)$  dle vztahu níže: [3]

$$E(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x * f(x) * dx ; \quad (44)$$

Značení střední hodnoty je možné i  $X$  s čárkou ( $\bar{x}$ ) pro výběr nebo  $\mu$  pro populaci. [3,9]

### 3.3.6 Variační rozpětí

Další důležitou statistickou charakteristikou náhodných proměnných je variační rozpětí, které se značí  $R$  a udává rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou souboru znaků pomocí vzorce: [3]

$$R = x_{max} - x_{min} ; \quad (45)$$

Táto charakteristika je vhodná pro intervalové rozdělení spojitých náhodných proměnných a případně u nespojitých náhodných proměnných, které disponují s hodně varianty. Pro získání variačního rozpětí daného statistického souboru rozdělíme soubor na určitý počet intervalů, které se nepřekrývají a mají stejnou šířku, a následně zjistíme počty hodnot patřících do těchto intervalů. [3]

Jelikož závisí pouze na dvou pozorováních, je nejvhodnější při reprezentaci variace malých datových souborů. [3]

### 3.3.7 Rozptyl

Jedná se o vyjádření rozdělení pravděpodobnosti náhodné proměnné, pomocí které se charakterizuje rozptýlení hodnot náhodných proměnných kolem střední hodnoty. Rozptyl, anglicky Variance, se značí  $s^2$ ,  $\sigma^2$  nebo  $D(X)$  a je obecně definován vztahem: [3]

$$D(X) = E\{[X - E(X)]^2\} ; \quad (46)$$

Pro diskrétní náhodnou proměnnou je definován vztahem: [3]

$$D(x) = \sum_x [x - E(X)]^2 * P(x) ; \quad (47)$$

Pro spojitou náhodnou proměnnou je definován vztahem: [3]

$$D(X) = \int_{-\infty}^{\infty} [x - E(X)]^2 * f(x) * dx ; \quad (48)$$

přičemž platí pro něj následující skutečnosti: [3]

- $D(k) = 0$ ,
- $D(k * X) = k^2 * D(X)$ ,
- $D(X + Y) = D(X) + D(Y)$ ,
- $D(X) = E(X^2) - [E(X)]^2$ .

### 3.3.8 Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka, anglicky standard deviation, značená  $s(X)$  nebo  $\sigma(X)$ , nám udává další důležitý parametr variability statistického souboru náhodných proměnných. [3]

Počítá se pomocí odmocniny z rozptylu dle následujícího vzorce: [3]

$$\sigma(X) = \sqrt{D(X)}$$





## 4 UKAZATELE SPOLEHLIVOSTI

Ukazatele spolehlivosti používané v praxi a matematicky vyjádřené se občas liší. Toto je způsobeno tím, že v reálném provozu se málokdy používají metody a postupy pro vyhodnocení určitého procesu na základě předdefinovaných striktních norem. V následujících dvou kapitolách budou vyjmenovány hlavní typické ukazatele spolehlivosti z ideálního provozu a z reálné praxe. [1,2,15]

V ideálním provozu se hledá reální příčina poruchy společně s vyhodnocením a vyčíslením ztráty, kde v reálném provozu se převážně očekává výkon a finanční rentabilita procesu.

### 4.1 Vybrané ideální ukazatele spolehlivosti

#### 4.1.1 Střední doba mezi poruchami

Název „mean time between failures“ sice ne úplně naznačuje, ale zkratka anglického názvu METBF ano, kde význam písmena „e“ ve zkratce znamená „elapsed“, že střední doba mezi poruchami nám vyjadřuje, očekávanou dobu, která uplyne mezi následnými poruchami. [17]

Zjednodušená definice pro METBF dle normy ČSN EN 61703 ed. 2:2017 vyjadřuje vlastně uplynulou střední dobu mezi poruchami včetně dob provozu a prostoje nehledě na to, či je objekt v provozuschopném stavu nebo ne, nebo či je v provozu, nebo ne. Střední doba mezi poruchami se počítá pomocí následujícího vzorce: [17]

$$METBF = MUT + MDT \quad (49)$$

kde:

- MUT je střední doba použitelného stavu, anglicky mean up time;
- MDT je střední doba nepoužitelného stavu, anglicky mean down time.

V případě, když není brán v potaz preventivní údržba, tak střední doba nepoužitelného stavu je roven střední doby do obnovy MTTR, anglicky „mean time to repair“ a v tom případě střední doba mezi poruchami se vyjadřuje pomocí vztahu: [17]

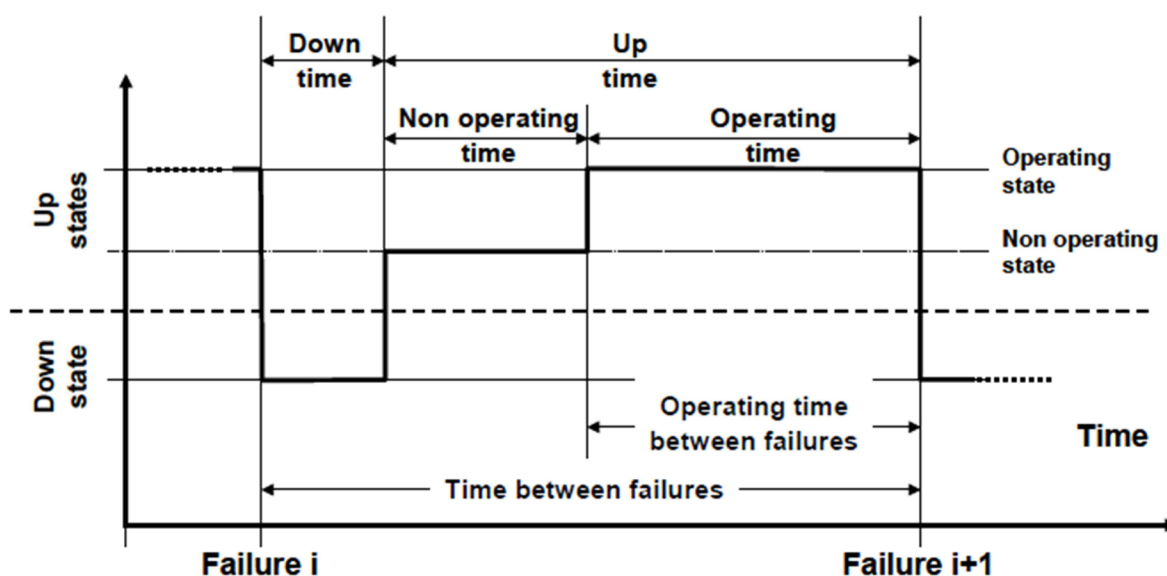
$$METBF = MUT + MTTR \quad (50)$$

Dále v případě nepřetržitě provozovaného objektu, anglicky „continuously operating item“ COI, je střední doba použitelného stavu rovna střední doby provozu do poruchy MTTF, anglicky „mean time to failure“ a v tom případě zas střední doba mezi poruchami se vyjadřuje pomocí vztahu: [17]

$$METBF = MTTF + MTTR \quad (51)$$

#### 4.1.2 Střední doba provozu mezi poruchami

Střední doba provozu mezi poruchami, anglicky mean operating time between failures, které se značí MTBF nebo MOTBF dle normy ČSN IEC 60050-192:2016 Mezinárodní elektrotechnický slovník – Část 192: Spolehlivost, vyjadřuje očekávanou střední dobu mezi jednotlivými poruchami, přičemž nepočítá s dobami prostojů. Kvůli tomu není rovno MTBF/MOTBF s METBF určené v normě ČSN EN 61703 ed. 2:2017. Podrobnější vysvětlení pojmů je na obrázku 11.: [17,18,19]



Obr. 11) Rozdíl mezi MTBF(MOTBF) a METBF [17]

Zjednodušeně nám MTBF udává průměrnou dobu očekávání toho, jak často objekt nesplní svou funkci. MTBF by se měla aplikovat pouze na opravované objekty dle pokynů normy a v případě neopravovaných by se měla použít střední doba provozu do poruchy MTTF. [17,19]

MTBF je relativní hodnota, která je nejvhodnější pro použití pro kritické zařízení nebo jeho část, přičemž v případě jeho použití a měření je kladen vyšší důraz na analýzu příčin poruch a rozvoj procesů a strategií, které mají cílem právě eliminaci těchto kořenových příčin poruch. [17,19]

MTBF se jednoduše počítá pomocí následujícího vzorce: [17,19]

$$MTBF = \frac{\text{provozní doba}}{\text{počet poruch}} ; \quad (52)$$

kde: [17,19,20]

- Provozní doba = součet všech časových intervalů, kdy je objekt v provozu,
- Počet poruch = počet všech jednotlivých poruch za celkový součet všech časových intervalů, kdy zařízení nesplnilo svou předepsanou funkci.

V případě exponenciálního rozdělení dob mezi jednotlivé poruchy a při neopravovaných objektech platí, že: [17,19,20]

$$MTBF = MTTF = \frac{1}{\lambda} ; \quad (53)$$

kde  $\lambda$  označuje intenzitu poruch.

#### 4.1.3 Střední doba provozu do poruchy

Ukazatel střední doby do poruchy, anglicky mean operating time to failure, je dle definice v normě očekávanou střední dobou provozu do selhání objektů. Značí se MTTF a je vyjádřena vztahem: [17,18,19]

$$MTTF = \int_0^{\infty} t * f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt ; \quad (54)$$

kde  $R(t)$  je pravděpodobnost bezporuchového provozu.

V případě neopravovaných objektů, které mají rozdělení provozní doby do poruchy exponenciálního charakteru a u kterých je intenzita poruchy konstanta, nebo v případě opravitelných objektů, když po obnově jejich stav je zaměnitelný s novým, tak je MTTF rovno převrácené hodnoty intenzity poruch: [17,18,19]

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} ; \quad (55)$$

#### 4.1.4 Pravděpodobnost bezporuchového provozu

Tento ukazatel, v anglickém překladu jen reliability, udává pravděpodobnost bezporuchového provozu, s jakou daný objekt bude plnit svou funkci za určitých podmínek během časového intervalu  $(t_1, t_2)$  a počítá se dle vztahu: [3,17]

$$R(t_1, t_2) = \int_0^{t_1} R(t_2 - t) * z(t) dt + R(t_2) ; \quad (56)$$

kde: [3,17]

- první člen rovnice vyjadřuje pravděpodobnost obnovy po poruše v časovém okamžiku  $t$ , přičemž doba  $t$  je menší než doba  $t_1$  a zároveň taky pravděpodobnost dožití do doby  $t_2$ ,
- $z(t)$  označuje okamžitý parametr proudu obnov objektu, kde  $z(t) * \Delta t$  vyjadřuje pravděpodobnost, že během intervalu  $(t, t + \Delta t)$  nastane obnova objektu,
- $R(t_2)$  vyjadřuje pravděpodobnost dožití do doby  $t_2$ .

V případě, když intenzita poruch má konstantní charakter a doby do poruchy jsou rozloženy exponenciálně, platí pro pravděpodobnost bezporuchového provozu následující zjednodušení: [3,17]

$$R(t_1, t_2) = \exp [-\lambda * (t_2 - t_1)] ; \quad (57)$$

Přičemž platí, že: [3,17]

- $t_1$  vyjadřuje začátek sledování,
- $t_2$  vyjadřuje konec doby sledování,
- $\lambda$  značí intenzitu poruch,
- $\Delta t$  značí dobu sledování.

#### 4.1.5 Intenzita poruchy

Ukazatel intenzita poruchy, anglicky failure rate, je v případě existence, limitou kvocientu podmíněné pravděpodobnosti, že k poruše objektu dojde v časovém intervalu  $(t, t + \Delta t)$ , při  $\Delta t$ , když  $\Delta t$  se blíží k nule, vzhledem k tomu, že k selhání nedošlo v časovém intervalu  $(0, t)$ . Intenzita poruch se značí  $\lambda(t)$  a počítá se dle vzorce: [3,17]

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} * \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} ; \quad (58)$$

kde:

- $F(t)$  a  $f(t)$  jsou distribuční funkce a hustota pravděpodobnosti v okamžiku poruchy
- $R(t)$  je pravděpodobnost bezporuchového provozu při  $R(t_1, t_2)$  pomocí  $R(t) = R(0, t)$ .

## 4.2 Ukazatele spolehlivosti z praxe

Ve výrobních podnicích, kde je základ spolehlivosti a vlastně tím i kvality definovaný schopností dodávat zboží v žádoucí kvalitě a včas je ve velké míře ovlivněna vstupními parametry jak do procesu, tak i do produktů, ale samozřejmě klade velký důraz na rentabilitu výroby. Z hlediska cílů výroby je důležité se zmínit o ukazatelích výrobní spolehlivosti, jako výtěžek prvního průchodu FPY (anglicky first-pass yield), vady na jednotku DPU (anglicky defects per unit), vady na milion příležitostí DPMO (anglicky defects per million opportunities), vady na milion dílů DPPM (anglicky defective parts per million) a zmetkovitost (anglicky scrap) které jsou jedním z nejdůležitějších ukazatelů spolehlivosti výrobního procesu, jelikož odhalují problémy, špatné nastavení a prostor pro zlepšení. [21,22]

### 4.2.1 FPY anebo správně napoprve a SCRAP

Zmetkovitost a oprava dílů vedou ke zvýšení finančních výdajů za výrobu. V některých případech je finančně výhodnější zmetkový díl opravit, než vyhodit, ale je potřeba počítat také s vícenáklady v podobě opravy a časové prodlevy, která je nedílnou součástí takzvaného re-worku, jelikož díl nebo výrobek musí projít znovu daným procesem, popřípadě čas na danou operaci se značně prodlouží. FPY je ukazatel kvality a spolehlivosti výroby, který jasně definuje, kolik procent dílů prochází výrobním procesem bez vad, tedy podíl kvalitních výrobků bez neshod na konci procesu. Tento ukazatel spolu souvisí s dalším ukazatelem zmetkovitosti SCRAP, jelikož se doplňují, kde FPY a SCRAP společně tvoří 100% výroby v případě neopravovaných objektů. V případě opravovaných objektů lze do zmetkovitosti počítat podíl opravovaných dílů, ale v technické praxi se to převážně nedělá. [21,23]

FPY se v některé anglosaské literatuře se nazývá TPY, anglicky throughput yield. V případě FPY, popřípadě TPY, se počítá s počty opravovaných dílů a bere se v potaz pouze počet napoprve správně vyrobených dílů. Podobně se počítá v případě takzvaného RTY, anglicky rolling throughput yield, který ale nepočítá v každém kroku procesu s opravovanými objekty a tím se soustřeďuje na celkový průchod procesem. V souhrnu je FPY součinem procentuálního podílu vyrobených výrobků bez zmetků v každém jednotlivém kroku výrobního procesu a počítá se následovně: [21,22,23]

$$FPY_t = FPY_1 * FPY_2 * FPY_3 * \dots * FPY_n \text{ [%] ;} \quad (59)$$

Kde: [21,22,23]

- $FPY_t$  je celkový průchod bez zmetků ale s opravovanými objekty od začátku až ke konci procesu,
- $n$  je počet kroků v procesu.

Obdobně se počítá i SCRAP, kde se ale násobí procentuální podíl zmetků z každého kroku daného procesu. [22]

#### 4.2.2 Vady na jednotku produktu a příležitost

DPU je jednoduchý procentuální poměr, který vyjadřuje kolik vad je na jednotku produktu. Počítá se dělením počtu vad celkovým počtem produktů. DPU nerozlišuje mezi jednotlivé typy vad a obecně se počítá dle následovného vzorce: [21,22]

$$DPU = \frac{\text{celkový počet vad}}{\text{celkový počet produktů}} [\%] ; \quad (60)$$

Podobným ukazatelem je počet vad na příležitost DPO, anglicky defect per opportunity, který na druhou stranu rozlišuje typy vad a počítá se dělením součtu vad (obvykle zjištěné vzorkováním) násobkem počtem typů vad a počtem produktů ze vzorkovacího výběru. DPO se počítá následovně: [21,22]

$$DPO = \frac{\text{celkový počet vad}}{\text{počet typů vad} * \text{celkový počet produktů z výběru}} [\%] ; \quad (61)$$

#### 4.2.3 Vady na milion příležitostí

Vady na milion příležitostí DPMO je velice důležitá metrika založena na ukazateli DPO, ale položená do skutečných výrobních hodnot. DPMO se používá v Six Sigma k měření výkonu procesu a je typicky odvozena z určitého výběru z populace výrobků. V případě, když již máme DPO vypočítaný, tak DPMO získáme jednoduchým vynásobením desetinného výsledku, nikoli procenta, jedním milionem znázorněno v následujícím vzorci: [21,22]

$$DPMO = DPO * 1000000 [ppm] ; \quad (62)$$

V případě měření výkonu Six Sigma procesu se používá následující vzorek pro určení úrovně procesu: [21,22]

$$6\sigma \text{ level} = 0,8406 + \sqrt{(29,37 - (2,221 * \ln(DPMO)))} [-] ; \quad (63)$$

#### 4.2.4 Vady na milion jednotek

Ukazatel vady na milion jednotek DPPM, v praxi obvykle používáno PPM, je metrika velice podobná k DPMO, která ale nepočítá s počtem typů vad, ale jen podílem počtu vadných kusů z výběru a celkovým počtem kusů z výběru vynásobeným miliónem jak již následující vzorec udává: [21,22]

$$DPPM = \frac{\text{počet vadných kusů}}{\text{celkový počet kusů z výběru}} * 1000000 \text{ [ppm]} ; \quad (64)$$





## 5 PODSTATA ANALÝZY SPOLEHLIVOSTI

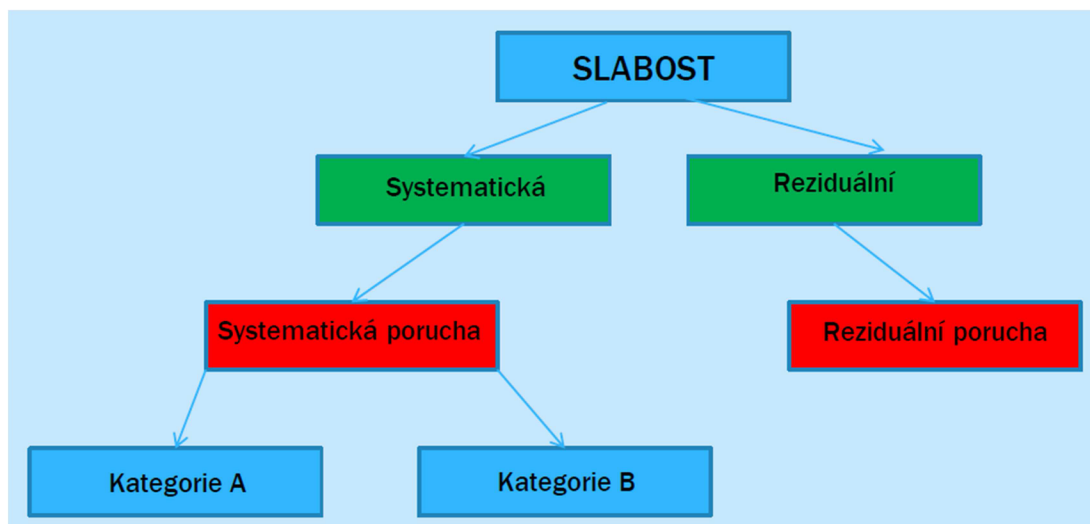
V současnosti mezi hlavní nástroje analýzy společnosti můžeme začlenit analýzy funkční struktury, analýzy kritických poruchových stavů z hlediska bezpečnosti, analýzy druhů poruchových stavů a mezních stavů z hlediska životnosti, analýzy mechanismů, projevů a následků poruch ve spojení s udržitelností. Také do těchto nástrojů můžeme zařadit strategie preventivní údržby a údržby po poruše. Analýzy spolehlivosti obecně nabývají různých charakterů dle etap životního cyklu objektu. V případě předvýrobních etap často zabezpečují pomocí studia potenciálně možných výskytů poruch i předpověď hodnot ukazatelů spolehlivosti pro další etapy. V následujících etapách, například během provozu a při zkouškách napomáhají zjištění skutečných příčin výskytů poruch, jejich následků a možné závislosti mezi nimi. Tyto příčiny se odhalují pomocí empirického zjištění ukazatelů spolehlivosti v podobě jejich bodového nebo intervalového odhadu. Právě pomocí toho zajišťují snižování poruch a zvýšení spolehlivosti obecně při stanovených nebo zjišťovaných skutečných podmínkách užívání. [2]

V případě, že využívají se tyto analýzy spolehlivosti v předvýrobní etapě životního cyklu, je dost možné, že objekt ještě fyzicky neexistuje a předpověď nebo náčrt jejich ukazatelů je možný pouze určitými predikčními výpočty, které musí splňovat určité prerekvizity. Předpověď ukazatelů spolehlivosti, bezpečnosti a životnosti těchto objektů je výsledkem vícestupňového poměrně složitého procesu, kde pro posouzení správnosti nejen těchto výsledků, ale i prostředků a metod pomocí kterého byli získány je nutné tento soubor dat doplnit i určitým souborem dalších informací, které uvádí například norma ČSN IEC 863:1992, která je již neplatná, ale je bez náhrady. [1,2]

V případě analýzy spolehlivosti je kladen velký důraz i na sběr dat, ze kterých informace jsou dále zpracovány v informačním systému spolehlivosti. V technické praxi je tento sběr dat obtížně měřitelný a prokazovaný, protože skutečné a vypovídající hodnoty ukazatelů je možno získat jen pomocí důsledného sběru dat, přičemž stejně důležitou roli hraje i volba vhodné statistické metody na zpracování a správná interpretace. Toto „měření“ spolehlivosti je náročný úkol, který nám může usnadnit vybudování a využívání informačního systému spolehlivosti, který je vybudován jako subsystém informačního systému kvality. [1,2]

Jedním z hlavních nástrojů na rozvíjení spolehlivosti je program růstu bezporuchovosti, který zpravidla by měl být součástí celkové aktivity ve vývoji zejména nově vyvíjených finálních výrobků s vyšší funkční složitostí, právě pomocí zvyšováním bezporuchovosti. K lepšímu pochopení podstaty a postupů růstu bezporuchovosti je třeba vymezit termín slabost tzv. poddimenzování, jako příčina, při kterém právě vlivem nedokonalosti konceptu fyzického nebo procesního určité části nebo subsystému dochází k poruše objektu. [1,2]

Z hlediska rozdělení slabosti dle příčin rozlišujeme dva základní typy, při kterých dochází k poruchám, a to systematické a reziduální jak je to znázorněno na obrázku 12. [2]



Obr. 12) Rozlišení reziduálních a systematických slabostí poruch [2]

Systematickou slabost lze odstranit nebo zmírnit její vliv v případě změny návrhu projektu, konstrukce nebo výrobního procesu. Také lze opatřit snížení této slabosti pomocí změny nebo omezení určitých vlivů v provozu nebo zlepšením efektivity dokumentace a pomocí standardizování součástek či dílů systému. Porucha ze systematické příčiny se z hlediska opatření dále dělí na další dvě kategorie, čímž jsou systematické poruchy kategorie A a kategorie B. Rozdíl je vztažen ke kategorizaci poruch na základě přijatelnosti pro organizaci, či už výrobce nebo zákazníka, kde v případě kategorie A se nepřijímají nápravná opatření s ohledem na nákladovost, časovou nebo technologickou náročnost nebo nízké riziko nebezpečí, a v případě kategorie poruch B organizace se rozhodne přijmout nápravné opatření k odstranění těchto systematických příčin. [1,2]

Zbytkovou, nebo tzv. reziduální slabost, lze těžko efektivně a přitom finančně přívětivě zamezit nebo odstranit, a proto cílem programu růstu bezporuchovosti je tedy snižování vlivů návrhem spjatých systematických slabostí. Předpokladem je, že tyto slabosti zpravidla nejsou známy, kým se neprojeví patrnou poruchou. V programu růstu bezporuchovosti se využívají laboratorní i provozní zkoušky, pomocí kterých jsou analyzovány předchozí a současné poruchy, hledány jejich základní příčiny a na základě možností navržena a implementována nápravná opatření s cílem korekce systematické korekce objektů, sestav či procesů. [1,2]

Dalším užitečným nástrojem je třídění namáháním pro zlepšení bezporuchovosti, anglicky reliability screening, který se dá definovat jako proces zjišťování slabých míst nebo objektů, s cílem odstraňování či opravy, pomocí použití namáhání vlivem prostředí (tlak, teplota, vlhkost, atd.) nebo provozním namáháním jako prostředku (silové zkoušení, destruktivní testování, atd.) ke zjištění těchto skrytých vad tím, že tyto vady vedou ke vzniku zjištěných příčin těchto poruch. Třídění namáháním se používá v první řadě u hardwarových objektů v případech, kdy mají tyto objekty v období časných poruch nepřijatelně nízkou bezporuchovost. Pro třídění namáháním se v praxi taky používají pojmy zahořování, třídící zkoušky či záběh. [1,2]

## 5.1 Stanovení nákladovosti životních cyklů

V případě nově vyvíjeného výrobku jede analýza spolehlivosti současně s dalším důležitým aspektem posuzování, čím je stanovení nákladů životního cyklu objektu, anglicky Life Cycle Cost = LCC. Cílem tohoto posouzení je docílení rentability projektu, vlastně dosažení vhodného poměru nákladovosti vzhledem ke kvalitě a to zejména k výsledné, životnosti, spolehlivosti a bezpečnosti. [1,2,15]

Postup oblastí využití této ekonomické analýzy v jednotlivých etapách životního cyklu zařízení, nebo v některých případech shodných i pro jednoduché objekty jsou následující: [1,2]

V první etapě životního cyklu, kterou je koncepce a stanovení požadavků, jak i název naznačuje hlavním úkolem je sběr požadavků dle zákazníka. Tyto požadavky v technické praxi se často zdokumentují v tzv. seznamu případů použití, anglicky use case, který by měl být jedním z prvních informací pro zabezpečení správné míry spolehlivosti a úrovně bezpečnosti plánovaného objektu. Cílem je znát všechny plánované a občas i neplánované využití objektu pro co nejefektivnější koncept návrhu, který je následně použitý pro modelování LCC dle požadavků zákazníka, ideálně prověřen výrobcem. Na základě těchto poznatků je možné předdefinovat odpovědnosti uživatele a výrobce, vztažené k objektu. [1,2]

V další etapě životního cyklu, kterou je návrh a vývoj, z hlediska výrobců je návrh objektu porovnáván s alternativními návrhy při současném hledání vhodného poměru nákladovosti proti ziskovosti a optimalizaci bezporuchovosti, udržovatelnosti a zajištění údržby, čímž vznikají první nápravní opatření k minimalizaci LCC a definují se první kritické požadavky pro kvalitu, anglicky Critical to Quality = CTQ. Opačně z hlediska uživatele je tato etapa ekonomicky rozhodující, jelikož často právě v této etapě řeší vyhodnocení nabídek pomocí vlastního modelu LCC a vybírá vhodného kandidáta z dodavatelů. [1,2]

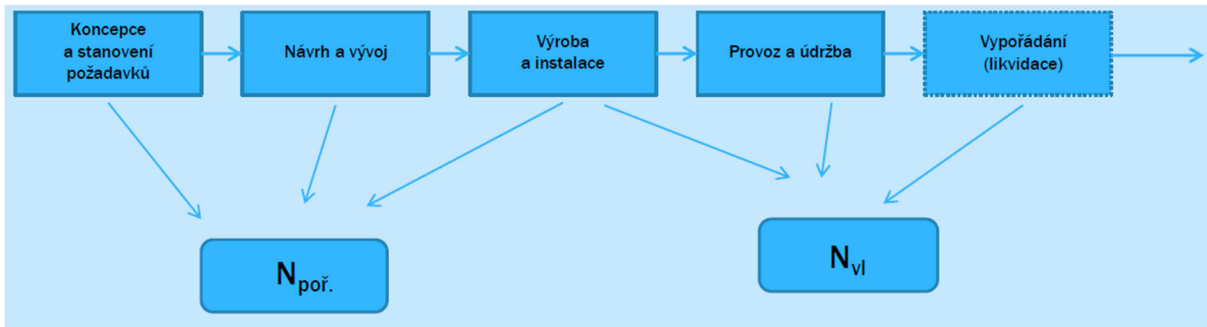
V třetí etapě životního cyklu, kterým je výroba a instalace, z pohledu výrobce se ověřují parametry z instalace objektu, z funkčních zkoušek a testovacího provozu pro finální posouzení a doladění vůči specifikaci. Zákazník na druhé straně v této etapě ověřuje shodu s požadavky během iniciálních zkoušek výroby. [1,2]

Ve čtvrté etapě životního cyklu, kde se už objekt reálně využívá, nazýván provoz a údržba se sbírají informace z ostrého provozu, čímž se zabezpečuje eliminace chyb návrhu, které se dostali do finálního výrobku a které se objevili a byli získáni v prostředí, kde každý faktor má vliv na funkčnost, spolehlivost a bezpečnost výrobku. Tyto informace jsou důležité jak pro výrobce, tak i pro uživatele produktu, jelikož dávají reálný obraz o činnosti produktu a vhodné vstupy do výpočtu finálního LCC a popřípadě také pro návrh vhodné údržby pro další generace objektu. [1,2]

Pro finální etapu životního cyklu s názvem likvidace charakterizuje pouze ověření parametrů z konečného odstranění objektu z provozu. Popřípadě v této fázi získané údaje

můžou mít pro výrobce využití pro vytipování komponent nebo částí, které byli poddimenzované, nebo předimenzované. [1,2]

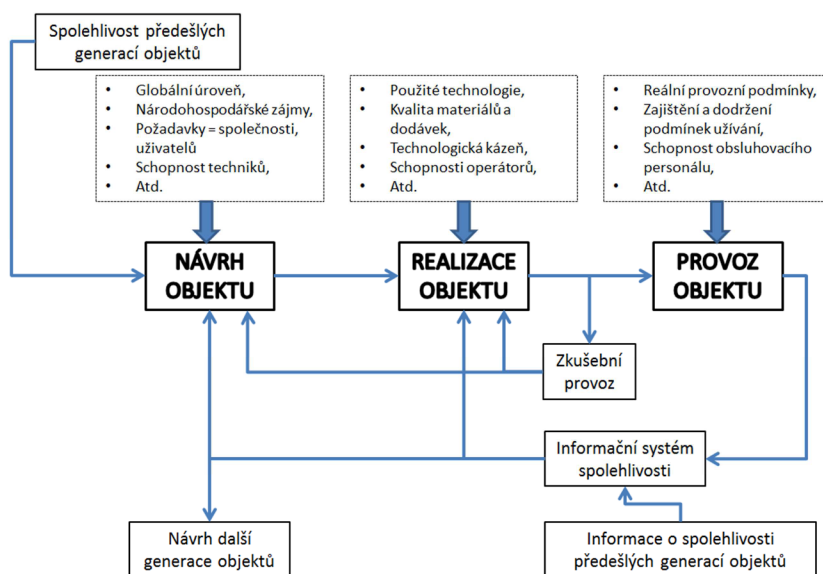
Obecně náklady životního cyklu LCC se dělí na dva základní typy nákladů skrz celý životný cyklus objektu a to na náklady pořizovací a na náklady vlastenecké, jak je to znázorněno na obrázku 13. [2]



Obr. 13) Hlavní skupiny nákladových složek [2]

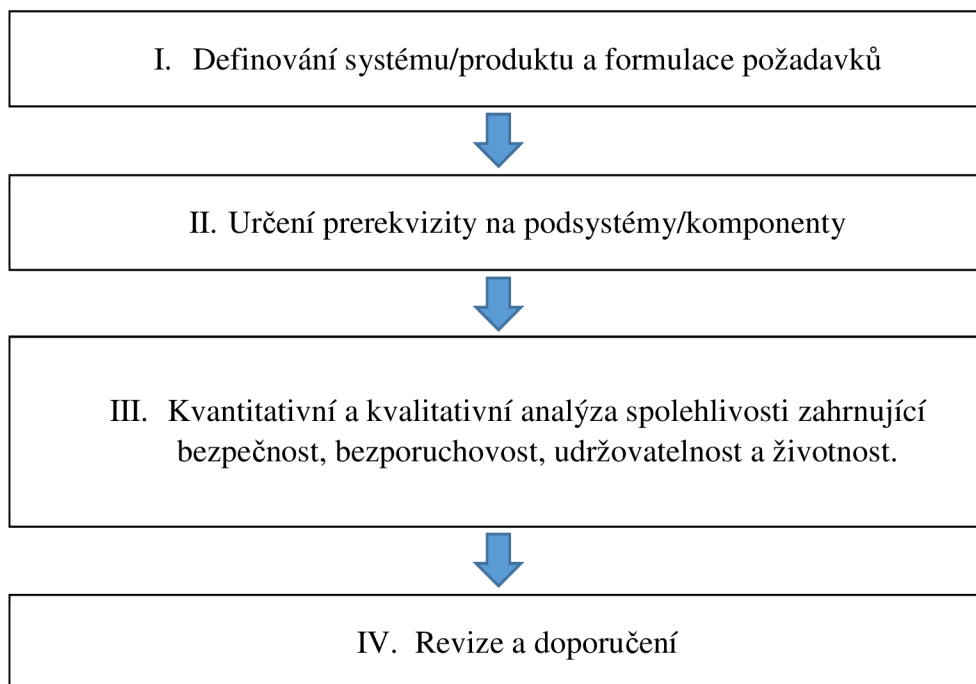
## 5.2 Postup analýzy spolehlivosti

Analýza spolehlivosti zahrnuje různé druhy zkoumání, kde cílem je prověřit objekt nebo systém, či jeho úroveň odpovídá očekávanému výsledku jednotlivých požadavků na spolehlivost ideálně systémovým přístupem. Systémový přístup vede k optimální strategii pro zabezpečení spolehlivosti s tím, že bere v potaz dopředních i zpětných vazeb v každé etapě životního cyklu objektu, přičemž jeho současným cílem je procesně optimalizovat ekonomicko-organizační a technické postupy a zároveň respektovat vliv vnějších faktorů. Vhodné schéma znázorňující systémový přístup spolehlivosti skrz celý životný cyklus objektu je znázorněn na obrázku 14. [1]



Obr. 14) Systémový přístup v případě řešení problematiky spolehlivosti [1]

Vhodný postup pro analýzu spolehlivosti dle ČSN IEC 60300-3-1:2003 z roku 2003 zahrnuje čtyři základní části dle obrázku 15. [1]



Obr. 15) Postup analýzy spolehlivosti podle ČSN IEC 60300-3-1:2003 [1]

Prvním krokem při analýze spolehlivosti obecně je vymezení a přesné určení hranic řešeného procesu či komponentu a následné formulace požadavků s přihlédnutím na různé provozní režimy a funkční vztahy. Při tomto prvním kroku je nezbytně důležitým prvkem vypracování seznamu všech požadavků na bezpečnost, životnost, bezporuchovost, udržovatelnost atd., přičemž se určují a zahrnují se i žádané a nežádoucí podmínky prostředí, provozu a požadavky na údržbu. Podobně se definují i poruchy a poruchové stavy související s bezpečností a životností systému nebo produktu a částečně je součástí tohoto úkolu i analýza možných následků poruch. [1,2,3]

Druhým krokem při analýze spolehlivosti je určení a definování požadavků na podsystémy a komponenty složitějších celků, přičemž v případě, že se vyžadují kvantifikovatelné charakteristiky, tak se předpokládá, že požadavky původně definované na celek se rozprostřou do nejnižší úrovně, a to komponent a funkčních částí. [1,2,3]

Třetím důležitým krokem je samotná analýza s aplikováním předem definovaných postupů a metod analýzy spolehlivosti, které rozlišujeme podle typu na kvalitativní analýzy a kvantitativní analýzy. [1,2,3]

Mezi kvalitativní typy analýzy spolehlivosti patří: [1,2,3]

- analýza funkční struktury systému nebo produktu zahrnující i určení mechanismů poruch, poruchových stavů, příčina a následků těchto poruch společně s projevy těchto poruch na systémech, či produktech a na jejich subsystémech a komponentách.,
- analýza udržovatelnosti,

- definice strategie údržby a opravy,
- zhotovení modelů bezporuchovosti, bezpečnosti, atd.

Mezi kvantitativní typy analýzy spolehlivosti patří: [1,2,3]

- stanovení referenčních charakteristik a provedení číselných analýz,
- analýza kritičnosti a citlivosti dílčích částí a komponent,
- vyhodnocení možných zlepšení vlastností systému nebo produktu vlivem aplikování předimenzování nebo nadbytečných podstruktur,
- vyhodnocení možných zlepšení vlastností systému nebo produktu vlivem strategie údržby, nebo rozšířením jeho působení,
- atd.

Čtvrtým, a tím i posledním, krokem analýzy spolehlivosti se dá definovat hodnocení a posouzení splnění požadavků na začátku navržených, definovaných a popřípadě vypočtených. Dohlíží se i na definování nápravních opatření k docílení prvotně vydefinovaných cílů. Tato analýza má za účel posoudit, či bezpečnostní, spolehlivostní a ekonomický požadavky byli dosaženy, či nikoliv a v případě různých alternativních variant vypovídat o tom, která kombinace návrhu je nejvíce ekonomicky přívětivá při zvýšení bezpečnosti nebo spolehlivosti. [1,2,3]

## 6 METODY ANALÝZY SPOLEHLIVOSTI

Analýza spolehlivosti systému nebo produktu je vlastně proces, jehož podstatou je zjišťování, zkoumání a vytřížení specifických a významných informací, které mají vypovídající hodnotu o něm a umožňují rozhodování a posouzení splnění stanovených cílů. Toto zjišťování a zkoumání má za cílem sestavení souboru informací o vlastnostech daného systému nebo produktu, a proto se obvykle vykonávají na modelech systémů a produktů. [1,2,24]

Obecně predikční analýzy spolehlivosti se využívají k přezkoumání a predikci ukazatelů bezpečnosti, pohotovosti, bezporuchovosti, a udržovatelnosti systému. Aplikují se převážně v ranních etapách životního cyklu, čímž je etapa volby koncepce a stanovení požadavků, ale provádí se i v dalších etapách dle potřeb, jako etapa návrhu a vývoje a etapa provozu a údržby, a to především pro určení a definování ukazatelů, a pro vyhodnocení z hlediska splnění předem určených požadavků spolehlivosti. [1,2,24]

Pro tyto účely zkoumání a co nejhlubšího poznání se právě využívá reprezentativní matematický, grafický nebo strukturální model systému nebo produktu, přičemž za daných podmínek použití znázorňují spojení mezi strukturou modelu a vlastnosti spolehlivosti. Jsou známy dvojce způsoby analýzy spolehlivosti zaměřené na popis a určení poruch – induktivní a deduktivní – určené níže: [1,2,24]

- deduktivní metody – Tento postup je charakteristický i pro metodu FTA, u kterého se při řešení analýzy postupujeme shora, od vrcholové události, směrem dolů až k základním jevům, přičemž se získávají a posuzují možné příčiny poruchového jevu,
- induktivní metody - Při této metodě se postupuje právě zdola směrem nahoru, a cílem hledání je vyhodnocení a získání poznatků o možných důsledcích, jednoduše hledání vrcholových událostí, které můžou nastat. Typickým příkladem pro induktivní metodu analýzy spolehlivosti je metoda FMEA.

Významné metody analýzy spolehlivosti a doporučení k jejich použití jsou vyjmenované v tabulce č. 1 níže, ale detailněji rozebírané budou jen metody použité v praktické části diplomové práce:

Tab 1) Vybrané metody analýzy spolehlivosti a vhodnost jejich použití [1]

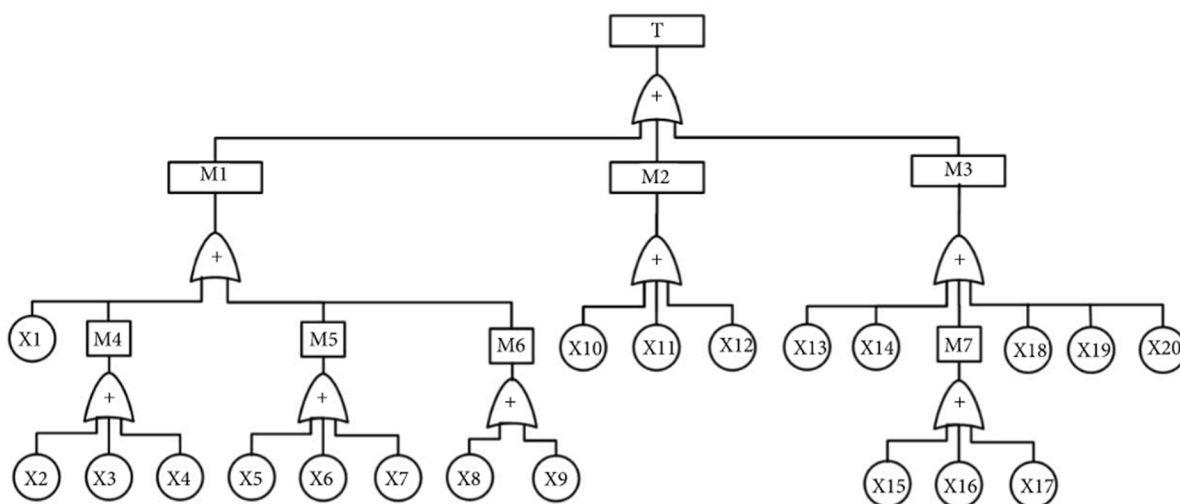
Zkratky a názvy metod	Použitelnost pro určení a rozvržení požadavků na spolehlivost	Kvantitativní analýza	Kvalitativní analýza	Použitelnost pro přezkoumání a doporučení
FTA – Analýza stromu poruchových stavů	Použitelná v případě, kdy není chování systémů silně závislé na čase nebo pořadí	Výpočet bezporuchovosti a pohotovosti systémů a relativních příspěvků podsystémů k nepohotovosti	Vyjádření Kombinace poruchových stavů	Je použitelná

		systemu		
FME(C)A – Analýza druhů a důsledků poruch (a kritičnosti)	Použitelná pro systémy, v nichž převládají jednotlivé nezávislé poruchy	V případě počítání kritičnosti pomáhá k určení priorit	Důsledky poruch	Je použitelná

## 6.1 Analýza stromu poruch/poruchových stavů

Metoda FTA, anglicky fault/failure tree analysis, byla vyvinuta a aplikována poprvé společností Bell Telephone Laboratories v šedesátých letech v USA. Metoda byla prvně používána v souvislosti s vývojem bezpečnostního systému startovací rakety. Později byla, tato metoda zdokonalena společností Boeing a navržen výpočtový program pro jeho použití pro kvantitativní a kvalitativní vyhodnocování stromů poruch. Jelikož metoda byla vhodná pro analýzu složitých systémů, složených z různých vázaných a funkčně závislých podskupin, jako jsou například komunikační systémy bezpečnostní systémy nebo technologické výrobní linky, tak se metoda postupně rozšiřovala kvůli své vhodnosti do jaderné energetiky. [1,24,25]

FTA je deduktivní metodou kvantitativní a kvalitativní analýzy spolehlivosti systémů, která se soustředí na zjišťování příčin, jak jednotlivých tak i jejich kombinace, přičemž následkem těchto příčin je vrcholová událost. Cílem této metody je zjišťování příčin poruch, určení možných příčin k danému finálnímu dopadu a také nás dovede k záznamu a analýze logických postupů poruch od specifických důsledků k základním příčinám. [1,24,25]



Obr. 16) Příklad stromu poruchových stavů [26]

Aplikace této metody lze rozdělit do čtyř skupin činností, kde pro první skupinu platí následující základní aktivity. Nejdříve se vymezí předmět analýzy a určí se provozní podmínky a požadovaná funkce společně s podrobnými informacemi o návrhu a sestavy celého systému. Následně se určuje vrcholová událost, anglicky top event, pro kterou se zkoumají a zjišťují různé druhy nebo možné příčiny poruchových stavů na funkční úrovni systému nižší o jeden stupeň, než vrcholová událost. [1,24,25]

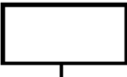


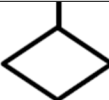




Pro následující, druhou skupinu, je charakteristické postupné rozvíjení vrcholové události přes jevy na nižších úrovních až k jevům na nejnižší základní úrovni, přičemž se zjišťují a vyhodnocují veškeré možné příčiny původu poruchového jevu na úrovni o jeden stupeň vyšší, než daná událost. Mezi základní, takzvaně primární události patří třeba různé druhy poruch součástí objektu, nebo výrobku. [1,24,25]

Charakteristickými body třetí skupiny aktivit při řešení FTA je pomocí otázek – Co? Kde? Kdy? Proč? – určit a popsat příčinu všech identifikovaných poruchových jevů na každé funkční úrovni. Pro přehledné zobrazení těchto výsledků se údaje zanesou do takzvaného stromu poruchových stavů, který se tvoří pomocí specifických symbolů, které jsou určeny v tabulce č. 2. [1,24]

Ve finální čtvrté skupině aktivit se pak provádí kvalitativní, či kvantitativní analýzy na základě sestaveného stromu poruchových stavů v závislosti na cílech analýzy, přičemž finálním výstupem je určení pravděpodobnosti s jakou pravděpodobností a při jakých podmínkách nebo kombinací různých faktorů, může vrcholová událost nastat. Mezi tyto faktory zahrnujeme provozní podmínky, prostředí a chybu lidského faktoru. [1,24]

Tab 2) Symboly používané pro sestavu stromu poruchových stavů [1,24]

Doporučený symbol	Funkce	Popis symbolu
	Vrcholová událost	Blok s popisem nebo názvem vrcholové události.
	Blok mezilehlé události	Blok s popisem nebo názvem události mezi vrcholovou událostí a základní událostí. Je možné uvést pravděpodobnost výskytu této události mezi značky.
	Základní událost	Událost, která má k dispozici pravděpodobnost výskytu a která se dále nedělí.
	Nerozvíjená událost	Událost nazývaná taky primární, která reprezentuje část systému, která dosud nebyla rozvíjena, nebo pro rozvinutí nebyl praktický důvod.
	Hradlo A (AND)	Událost nastane pouze v případě, když se nastanou současně všechny vstupní události.
	Hradlo NEBO (OR)	Událost nastane ve všech případech, kdy nastane alespoň jedna vstupní událost.

## 6.2 Analýza způsobů a důsledků poruch FMEA

Metoda analýzy způsobů a důsledků poruch FMEA, anglicky failure mode and effects analysis, je metoda pro hodnocení objektů nebo procesů, jejímž cílem je systematicky identifikovat způsoby a důsledky způsobu poruch, kde tyto poruchy mohou mít vliv na

pracovníky, okolní prostředí, ale především na výkonnost, kvalitu a spolehlivost daného objektu, nebo procesu. Analýza FMEA se může provádět i několikrát v průběhu životního cyklu daného objektu nebo procesu. Během životního cyklu v etapě návrhu a plánování lze provádět počáteční, takzvaně předběžnou analýzu, která je na vyšší úrovni a míří pro zajištění nápravných opatření na systémové úrovni. Následně, když jsou k dispozici podrobnější informace o nižších úrovních objektu nebo procesu, následuje podrobnější analýza. Analýza FMEA může zahrnovat již existující nápravní opatření či doporučení, která byla nasazena na eliminaci nebo snížení výskytu nějakého způsobu poruchy nebo jeho důsledků. [27]

Cílem analýzy FMEA je určit veškeré způsoby, jakými by procesy nebo objekty mohly selhat popří plnění svých funkcí. Hlavním účelem je zdokumentování těchto způsobů poruch a jejich důsledků, což pomůže při stanovení priorit, abychom se mohli identifikovat a aplikovat nezbytně nutné nápravné opatření a akce ke snížení frekvence výskytu, nebo právě zvýšení detekce těchto nežádoucích stavů. Přiřazení těchto priorit může značně pomoci v rozhodování o ošetření. FMEA nabízí systematickou metodu na místní i globální úrovni pro identifikaci způsobů poruch a jejich důsledků pro dané objekty nebo procesy. V případě když důsledky poruch a vad se doplní i o hodnocení kritičnosti, tak se jedná o modifikovanou analýzu nazývanou analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch FMECA, anglicky failure mode, effects, and criticality analysis. [24,27]

#### Historie FMEA

Metoda FMEA byla vyvinuta a realizována v 60. letech v Americe pro kosmický projekt názvem Apollo. Po osvědčení, táto metoda se začala rychle rozšiřovat i pro jiné technické oblasti v rámci důležitých státních projektů, která vedla ke zpracování a vydání vojenské normy. V této normě byla metoda analýzy zobecněna a standardizována, přičemž byli zformulováni základy používání a provádění této metody. V následujících letech došlo k rozšíření metody, která našla široké spektrum uplatnění i v dalších oborech, zejména v automobilovém průmyslu. Vlivem nasazení FMEA v oblasti automotive se rozšiřování a aplikace této metody vedla k celosvětovému použití, která v dnešní době je jednou z nejvíce používaných metod kvalitativní, a občas i kvantitativní, analýzy spolehlivosti v různých etapách životního cyklu technických zařízení, procesů, ale i softwaru. [1]

### 6.2.1 Rozdělení FMEA dle způsobu použití

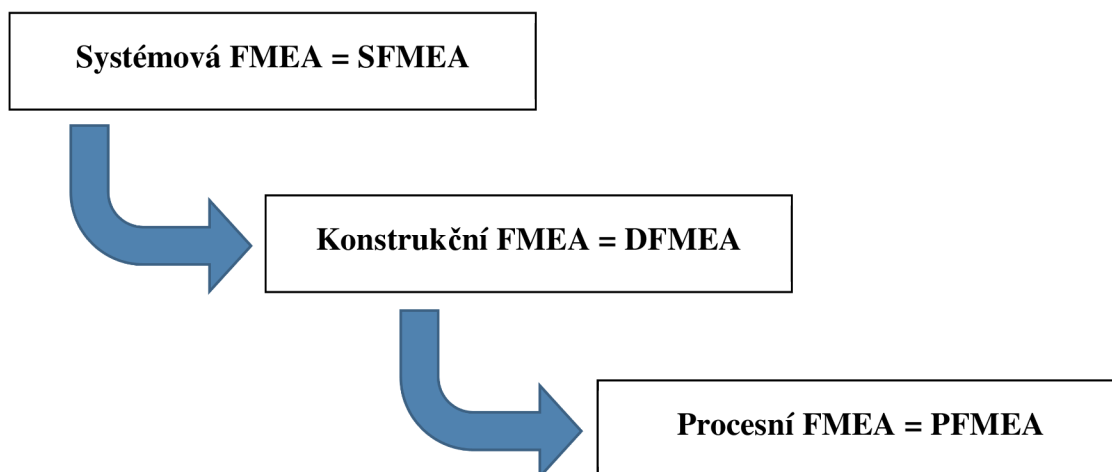
Jak již bylo výše zmíněno, metoda FMEA lze použít v různých oblastech a pro různé účely. Dle způsobu použití a na základě období dle životního cyklu objektu, procesu nebo softwaru lze rozlišovat následující typy metod FMEA: [1,27,28]

- Systémová FMEA, občas zmiňováno jako S-FMEA nebo P-FMEA (produktová FMEA), kde v případě systémové SFMEA se v ranní fázi vývoje zkoumá funkční souvislost jednotlivých dílů konstrukce, nebo operací daného procesu, přičemž se provádí analýzy všech prvků, aby dosáhlo komplexnímu pochopení souvislostí v často rozsáhlých a složitých celků. Občas se, táto metoda, nazývá funkční FMEA, jelikož je

aplikuje pro analýzu funkcí v různých stupních systémů. Systémová, nebo produktová FMEA i když není zpravidla vždy využívaná a aplikovaná dává přehled o návaznostech na vyšších úrovních složitosti a může být základem na rozvinutí dalších verzí analýz FMEA na nižších úrovních složitosti.

- **Konstrukční FMEA**, občas značeno K-FMEA, ale převážně známá jako DFMEA, anglicky design failure mode and effects analysis, která se aplikuje ještě před samotnou realizací konstrukci a je převážně součástí technického návrhu projektu. Jejímž cílem je minimalizace nákladů a zabezpečení vysoké úrovně bezpečnosti a spolehlivosti dané konstrukce s důrazem na každou etapu životního cyklu daného produktu nebo procesu. Pomocí DFMEA je možné různé koncepty analyzovat a vybrat nejvíce vhodnou pro realizaci. Vytváří se v případech, kdy se jedná o návrh nového dílu, nebo došlo ke změně původních zákaznických požadavků. Dále může být zapotřebí, když se objevili funkční nebo jiné nedostatky, popřípadě pochybnosti o bezpečnosti, ekologické nezávadnosti.
- **Procesní FMEA** se vytváří ještě před samotnou výrobou konstrukce, přičemž samotný návrh konstrukce je finalizován a probíhá fáze realizace procesu. Jejímž cílem je vyhledávání a hodnocení různých možností poruch v procesech, které mohou vést ke snížení efektivnosti, bezpečnosti a spolehlivosti výrobního procesu, a současně aplikovat v případech potřeby vhodné opatření na zvýšení odhalení a nápravy, nebo snížení výskytů odhalených poruch.

Na obrázku 17 níže je objasněna návaznost těchto různých kategorií analýz a případný postup pro jejich strukturované vytvoření.[28]

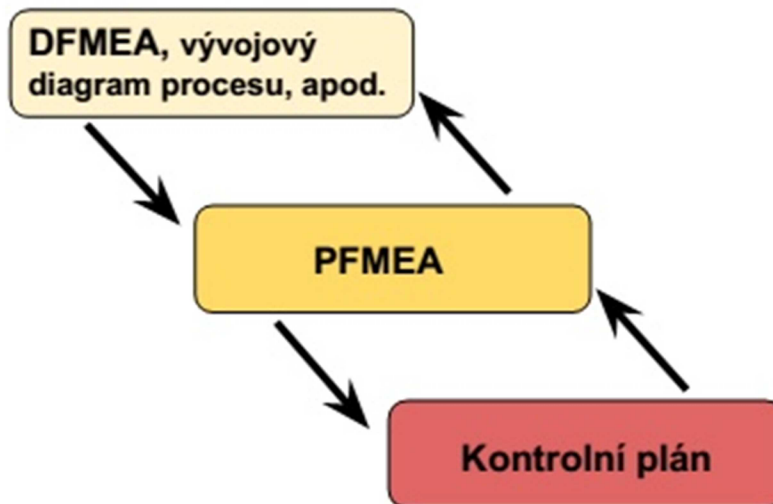


Obr. 17) Návaznost druhů FMEA [28]

### 6.2.2 Návaznosti mezi FMEA a další dokumentací

FMEA jak již bylo zmíněno je indukivní metoda, takzvaně „zdola nahoru“, která v technické praxi taktéž podléhá požadavkům neustálého zlepšování dle PDCA cyklu, které jsou základem k dosažení vysoké úrovně kvality a spolehlivosti. Důležitým propojovacím článkem

v přenášení této potřeby a veškerých technických, funkčních, legislativních, bezpečnostních a spolehlivostních požadavků je právě PFMEA mezi DFMEA a kontrolním plánem, anglicky control plan, dále jen CP. Toto propojení a návaznost je velice důležité, jelikož PFMEA, vlastně každý FMEA je živým dokumentem. Vztahy mezi tyto dokumenty jsou znázorněné na obrázku 18. Úroveň a struktura této dokumentace by měla vždy reprezentovat současný stav procesu. [29,30]



Obr. 18) Návaznost dokumentace PFMEA [29]

Jak již obrázek č. 15 výše naznačuje, DFMEA je jedním z nejdůležitějších vstupů pro PFMEA, která zase je základním vstupem pro CP. DFMEA hodnotí funkce dílů a proto je důležité, aby pro vytvoření bylo k dispozici následující řada informací a dokumentací: [29,30]

- požadavek zákazníka,
- technická specifikace návrhu,
- legislativní a normativní požadavky,
- QFD (Quality Function Deployment) - metodu, jejímž cílem je zapracovat požadavky koncových zákazníků do finálního výrobku
- matice vzájemných vztahů a rozhraní mezi nimi,
- zkušenosti z podobných návrhů.

Podobné vstupy jsou zapotřebí pro vytvoření PFMEA, ale přídatnými vstupy jsou: [29,30]

- vlastní DFMEA,
- vývojový diagram procesu,
- kusovník finálního návrhu konstrukce.

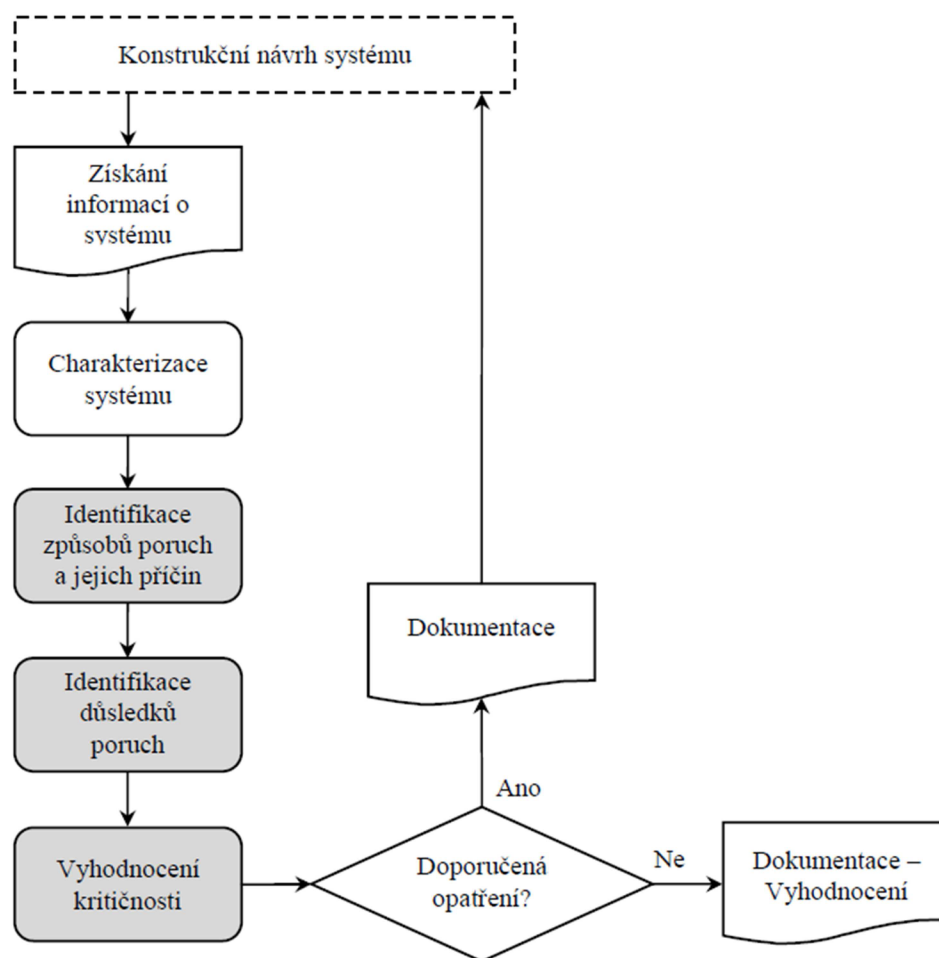
Z hlediska vytvoření vhodné CP, je zapotřebí brát v úvahu opatření a jejich následnou kontrolu doporučených v PFMEA, kde tyto nástroje řízení a kontroly se musí objevit v samostatném plánu kontroly a řízení a jejich metody vzájemně shodné. [1,30]

### 6.2.3 Postup provádění FMEA

V základě postup provádění analýzy FMEA lze rozdělit do 3 základních fází: [24,27,31]

- Přípravná fáze - takzvaná fáze plánování,
- Samostatná analýza FMEA – zahrnující analýzu struktury, funkcí, chyb, opatření a případnou optimalizaci,
- Vyhodnocovací fáze – takzvaná fáze dokumentování zahrnující vazbu na realizaci, uvolnění a komunikaci.

Na obrázku 19 je popis obecného postupu analýzy. [24]



Obr. 19) Základní postup analýzy FMEA [24]

#### Požadavky a části postupu plánování FMEA

Tato první část analýzy FMEA je velice důležitá, jelikož zahrnuje jak nashromáždění informací a základních dat potřebných na provedení vlastní analýzy, ale i zvažování, proč je potřeba analýzu provádět. K těmto nezbytným základním informacím k provedení analýzy patří především: [24,27,30]

- Vymezení cílů a účelů analýzy, které se provádí zejména proto, aby se jednak dokázalo, že daný systém, objekt nebo proces vyhovuje požadavkům z hlediska spolehlivosti a bezpečnosti. Na druhou stranu aby se vymezili kritické komponenty z hlediska rizikových dopadů jejich závad při plnění požadované funkce s cílem omezit výpadek celého systému.
- Určení termínů splnění a požadavků na hloubku analýzy, které jsou důležité kvůli identifikaci potřebné nejnižší úrovně analýzy, kde jednotlivé komponenty na dané úrovni jsou považované za dále nedělitelné prvky, které mají jasně vymezené funkce a způsoby poruch. V případě, že se jedná o nejnižší úroveň analýzy, je potřeba brát v potaz následující body:
  - vymezený účel a cíle analýzy,
  - složitost systému,
  - míra znalostí na různých úrovních struktury systému o přesných funkcích a všech způsobech poruch,
  - úroveň nápravné a preventivní údržby,
  - možnosti modelování funkcí systému různých úrovní struktury systému,
  - možnosti využití analyzačního softwaru.
- Požadavky na spolehlivost a bezpečnost systému z hlediska technických cílů a legislativních požadavků.
- Popis funkce a struktury systému, která musí shromažďovat podrobný popis funkcí a propojení, vazeb, posloupností jednotlivých částí systému, doplněné o detailní výkresovou dokumentaci zahrnující a vazby na provozní podmínky systému. V této části je potřeba přesně vydefinovat rozhraní systému, vymezení hraniční body a součásti, při kterých dochází k interakci s okolními systémy nebo s vnějším prostředím. Základní informace potřebné pro požadovanou hloubku analýzy na úrovni každého komponentu nebo části jsou vyjmenovány níže:
  - jednoznačná identifikace komponent nebo částí pomocí čísla výkresu, katalogového čísla, nebo čísla prvků znázorněných na výkresech nebo v dokumentaci,
  - popis funkce každé komponenty nebo části,
  - popis veškerých možných poruchových stavů,
  - popis důsledků poruch jednotlivých komponent nebo částí,
  - intenzity jednotlivých způsobů poruch komponent nebo částí (v případě, když je vyžadována kvantitativní analýza),
  - zdroje informací o intenzitách poruch (v případě, když je vyžadována kvantitativní analýza).
- Požadavky a informace o systému preventivní a nápravné údržby,
- Informace o podmínkách prostředí,
- Požadavky na zdroje, pod čím se myslí na informační zdroje, zdroje pracovníků, kde hraje důležitou roli jejich znalosti o problematice (systému, produktu, procesu) společně se schopnosti facilitátoru, a v neposlední řadě zdroje fyzické.

## Postup vytvoření FMEA

Při samostatní analýze se na nejnižší úrovni, a na každý prvek, se aplikují následující kroky pro postup vytvoření analýzy: [24,27,30]

- Stanoví se všechny způsoby poruch, jejich možné příčiny a veškeré jejich důsledky;
- Stanoví se vhodné metody a opatření k správné detekci a vymezení poruch,
- Proveďte se kvalitativní posouzení poruch a určí se alternativní opatření,
- Vyhodnotí se pravděpodobnosti poruch (v případě potřeby kvantitativní analýzy),
- Přiřadí se kritičnost ke všem poruchám (v případě potřeby kvantitativní analýzy).

Výše vyjmenovaný postup je možné na základě potřeb modifikovat, zejména rozšiřovat, aby se zabezpečila požadovaná úroveň analýzy potřebné k posouzení bezpečnostních a spolehlivostních aspektů. Pro záznam těchto kroků analýzy je možné použít uspořádané a vhodné pracovní formuláře, popřípadě využít softwarové podpory, které zabezpečí, že analýza bude prováděna systematicky. Vhodné návrhy těchto formulářů jsou k dispozici v normách, ale vždy by se mělo dbát na to, aby použitá forma uspořádání odpovídala požadavkům charakteru analyzovaného systému a vymezeným cílům. [24,27]

Základní pracovní formulář FMEA by měl obsahovat alespoň následující informace: [24,27,30]

- Identifikace prvků – Identifikace je potřeba, aby byla jednoznačná stejná jak odkázání v jiných dokumentacích pro účel jistého rozlišování prvků se stejným názvem. Můžou se použít informace pro specifikace prvků na základě označení ve vývojovém diagramu procesu, nebo například čísla výkresů jednotlivých dílů.
- Definice názvu prvků – Názvy prvků by měli souhlasit s identifikací těchto prvků skrz celou dokumentaci. Cílem je aby se jednoznačně určil každý prvek, což je možné pomocí přiřazení identifikačních čísel.
- Vymezení a definice funkce prvků – Jak již název napovídá funkce prvků lze pochopit jako činnost, prostřednictvím které prvky plní požadovaný účel. Dá se to chápat jako důvod pro jejich existence a právě kvůli tomu je důležité, abychom byli zdokumentované a přesně určené, jelikož z nich se skládá celý systém. Je potřeba zdokumentovat požadované, ale i nežádoucí funkce pro přesnější vymezení mezních stavů. Zdokumentování požadavků jednotlivých předpisů a podmínek prostředí by měli být rovněž součástí určení funkcí.
- Identifikace způsobů poruch – Pomocí jevu způsobu poruch je možné identifikovat a odhalit poruchu na jednotlivých prvcích a je nezbytné zaznamenat veškeré způsoby poruch, který vedou k selhání jednotlivých prvků.
- Odhalení možných příčin poruch - Cílem je možnost posouzení zdroje výskytu poruchy a tím pádem se odhalili následků a návrh souboru nápravních opatření,

příčemž je potřeba myslet na to, že způsob vymezené poruchy může mít více jak jednu příčinu.

- Určení důsledků poruch – Důsledky jednotlivých poruchy mohou být příčinami i více druhů závad jednoho či více objektů, přičemž se k těmto důsledkům se mají přiřazovat stupně kritičnosti nebo závažnosti na základě poznatků abychom se určil stupeň závažnosti daného důsledku. V případě důsledků můžeme rozlišit na systémové úrovni tzv. konečné důsledky vztahující se k většímu bloku a na úrovni prvků, na takzvané místní důsledky. Je žádoucí vyhodnotit důsledek veškerých poruch na nižších, i nejnižších úrovních, jelikož kombinace určitých poruch, která samostatně nevede k závažným důsledkům, může v kombinaci s jinými poruchami způsobit závažné následky.
- Vymezení metod pro detekci poruch – Zvláštní důraz je kladen na určení a popis metod pro objevování poruch, zejména v případě skrytých poruch, kde obsluha není informována pomocí předem definované a zabudované varovného systému. Definice možných detekcí poruch je velice důležitý pro návrh vhodných preventivních opatření, nebo návrhy systému preventivní a proaktivní údržby.
- Návrh klasifikace závažnosti poruch – Pomocí této klasifikace je možné posoudit a zařadit jednotlivé důsledky způsobů poruch do určitých předem definovaných kategorií přijatelnosti dané závažnosti poruch. V praxi pomocí této klasifikace se určí úroveň závažnosti důsledků poruch, které jsou nebo již nejsou přijatelné z hlediska spolehlivosti a bezpečnosti.
- Získání nebo stanovení pravděpodobnosti výskytu poruchy – Tyto informace se obvykle dají získat z údajů od výrobců prvků, z provozních vypořádání nebo například z databází informací o bezporuchovosti prvků a současně by se měli uvádět pro každou poruchu.
- Určení nebo výpočet kritičnosti poruchy – Obecně se jedná o určitou metodu jak určit kritičnost poruchy pomocí hodnoty závažnosti na základě jeho pravděpodobnosti vzniku. Obvyklým způsobem na výpočet kritičnosti poruchy slouží přístup na základě takzvané čísla priority rizika RPN, anglicky risk priority number, který se počítá pomocí vzorce číslo 65. Jednotlivé stupnice na hodnocení RPN se určují na začátku analýzy dle potřeb kritičnosti a dle odhadu míry podrobnosti rozlišení.

$$RPN = S * O * D [-] ; \quad (65)$$

Kde

- **S** = vyjadřuje závažnost, anglicky severity, důsledku poruchy pomocí bezrozměrného čísla, převážně vyjádřené na stupnici od 1 (nejvíce mírná) až 10 (nejvíce závažná),



- **O** = vyjadřuje pravděpodobnost výskytu, anglicky occurrence, obvykle znázorněna kategorií četností taktéž pomocí stupnice od 1 (nejméně pravděpodobná) do 10 (nejvíce pravděpodobná) místo uvedení skutečné pravděpodobnosti,
- **D** = vyjadřuje klasifikaci míry detekce, anglicky detection, obvykle pomocí stejné stupnice od 1 (nejvyšší míra detekce, v podstatě jistá) do 10 (velice nepravděpodobná detekce).

### Vyhodnocení FMEA

Cílem analýzy FMEA je přijetí souboru vhodných nápravných opatření, se záměrem na odstranění příčin nežádoucích a nejvíce závažných typů poruch, popřípadě na snížení stupně závažnosti poruch. Výsledky analýzy se hodnotí na základě požadavků stanovenými v normách, technických nebo jiných předpisech nebo dle požadavků, které byly určeny pro daný produkt nebo proces zákazníkem. Následně, po porovnání pomocí dalších doplňkových znalostí získaných během provádění analýzy, se určí skutečné nápravní opatření. Tyto opatření a jejich zavedení, nebo aplikaci lze sledovat přes formulář analýzy, který lze brát jako dokončený a aktuální v případě, že každé opatření a každá akce byla dokončená a ověřena. Tyto akce a opatření mají možnost: [24,27,30]

- úplné eliminace příčin poruchy;
- ke snížení četnosti výskytu poruchy;
- ke snížení RPN na přijatelnou úroveň;
- ke zvýšení míry detekce.

Nad rámec výše popsaných účinků a impulzů ke zlepšení, je možné podle výstupů analýzy navrhnout nebo doplnit: [24,27]

- zlepšený a zaměřený systém údržby, s cílem předcházení kritických poruch;
- zlepšený systém technické diagnostiky pro včasné odhalení objevujících se příčin vzniku poruch;
- definovaný program zkoušení spolehlivosti pro kritické prvky.



## 7 METODA SIX SIGMA

Znak řecké abecedy „ $\sigma$ “ (sigma) je často používaný termín statistiky pro směrodatnou odchylku populace. Směrodatná odchylka určuje rozsah rozdílů nebo odlišností v datech z procesu, popřípadě v určité skupině položek. Six Sigma, značeno i jako „ $6\sigma$ “, je metoda vyvinutá pro organizace, které cílí dosáhnout výhody v konkurenčním prostředí. Hlavní záměr metody spočívá v následujících bodech: [32,33]

- řízení zdokonalování procesů a rozhodování na základě statistických závěrů,
- spolehlivé měření obchodních výsledků,
- předcházení nejistotám a chybám,
- spojení vysoké návratnosti a zajištění přínosů v krátkodobém, střednědobém a dlouhodobém období,
- odstraňování plýtvání (v japonštině Muda) z jakéhokoliv procesu.

Součinitel metody Six Sigma, nazvané Sigma ( $Z_{\text{value}}$ ), který je určitým ukazatelem kvality a spolehlivosti procesu a přímo vyjadřuje výkonnost procesu v podobě schopnosti poskytování výrobku nebo služby, které přímo splňují očekávání zákazníků. Součinitel se může přímo vázat k: [33]

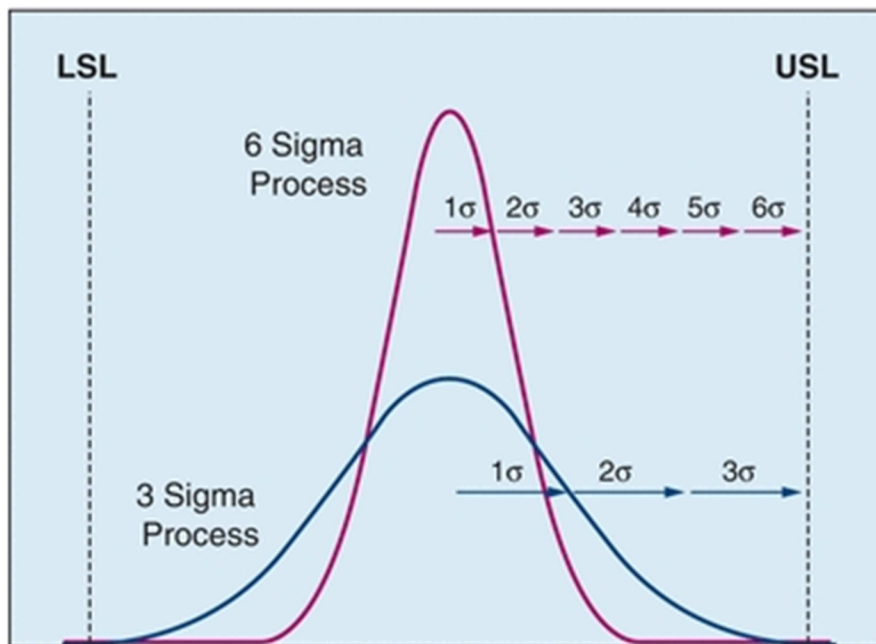
- a) k podílu kladných výstupů procesem produkovaných, nebo
- b) k podílu záporných výstupů procesu, které jsou obvykle vyjádřeny v procentech, v ppm nebo jako DPMO.

Definice metody Six Sigma: „*Metoda Six Sigma je flexibilní a úplný systém dosahování, udržování a maximalizace obchodního úspěchu. Je založena na porozumění a očekávání zákazníků, správném používání dat, faktů a na detailní statistické analýze a na základě pečlivého přístupu k řízení, zlepšování a vytváření nových výrobních, obchodních a obslužných procesů.*“ [34]

### 7.1 Historie a principy metody Six Sigma

Počátky metody Six Sigma, respektive Lean Six Sigma, sahají až ke spuštění první pásové výroby Henry Fordem v roce 1913. Tehdejší metodu nemůžeme považovat na stejné úrovni vyspělosti, jelikož prošla skoro stoletým vývojem, než se dostala do dnešní podoby. Dalším významným průkopníkem metody Lean Six Sigmy byl Walter A. Shewhart, který v roce 1924 představil regulační diagramy, základy statistické regulace procesů, a následně společně s Demingem představili tzv. PDCA cyklus. Po druhé světové válce se významně rozvinula rozvoj průmyslové racionalizace pomocí významné spolupráce mezi americkými a japonskými vědci. Mezi důležité osobnosti průmyslové éry patří Taguchi (statistické metody), Ishikawa (diagram rybí kosti) a také Taiichi Óno, Šigeo Šingó a Eidži Tojoda, vynálezci TPS (Toyota Production System). V roce 1986 vznikla metoda Six Sigma, kdy Bill Smith zavedl tento koncept posuzování kvality na základě variability procesu a směrodatných odchylek ve společnosti Motorola. Tento koncept byl v roce 1995 dále vyvíjen ve společnosti General Electric. [34,35]

Měření a statistika je základem metody Six Sigma, který je založen na statistické analýze procesu. Pojem Six Sigma znamená šest standardních odchylek a je odvozen z řízení procesu, kde 3,4 DPMO (3,4 defektů na milion příležitostí) je dosaženo i v případě vybočení střední hodnoty  $\mu$  o  $1,5 \sigma$ . Toto znamená, že mezi středním průměrem a jeho horními a dolními limity je zachována vzdálenost 6 standardních odchylek, jak znázorněno na obrázku 20. Podobných výsledků v procesech může vykázat jen velice omezená skupina společností. [32,33,35]



Obr. 20) Rozdíl mezi 3 $\sigma$  a 6 $\sigma$  procesem [22]

Úroveň procesu dle Six Sigma, značen Sigma ( $Z_{value}$ ), se může určit různě pro spojitá a diskrétní data. U diskrétních dat je vyjádření Sigma ( $Z_{value}$ ) pomocí DPMO. U spojitých dat můžeme získat Sigma ( $Z_{value}$ ) jako počet směrodatných odchylek  $\sigma$  reprezentující vzdálenost od střední hodnoty  $\mu$  k bližší toleranční mezí, kde USL je horní a LSL dolní toleranční mez specifikace procesu dle vzorce níže: [35,37]

$$Z_{value} = \min \frac{(USL - \mu; \mu - LSL)}{\sigma} [-] ; \quad (66)$$

Filozofie metody Six Sigma bere všechny práce a úkoly jako na procesy, které lze definovat, měřit, analyzovat, vylepšovat a kontrolovat. Procesy vyžadují vstupy (x) a vytváří výstupů (y). Pokud ovládáte vstupy, ovládáte výstupy. To se obecně vyjadřuje jako  $y=f(x)$ . [38]

Metoda Six Sigma lze popsat pomocí šesti principů z hlediska přístupu k implementaci a zaměření: [32]

- 1) Zaměření na zákazníka je prioritou – pochopit požadavky zákazníka a mít cílem splnit zákaznické očekávání.

- 2) Řízení na základě objektivních informací a faktů pomocí sběrů dat, analýze dat a rozhodnutí jak ty data využít k dosažení cílů a při implementaci vhodných akcí.
- 3) Soustředění na zlepšování procesů – řídit procesy dle metody Six Sigma s cílem snížení variace v procesech a zvýšení výkonnosti, spolehlivosti a kvality.
- 4) Zapojení managementu a propagace proaktivních cílů – je právě opakem reaktivního přístupu. Cílem je plánování s důrazem předcházení problémům.
- 5) Spolupráce bez hranic – zlepšení spolupráce mezi prodejci a zákazníky ale také mezi společnostmi.
- 6) Neustálé zlepšování s hlavním cílem dokonalosti, ale tolerování i neúspěšnosti – nové metody a cíle přinášejí i určité rizika, které je potřeba přijmout abychom se dosáhla lepších výsledků.

## 7.2 DMAIC

DMAIC je pro metodu Six Sigma hlavním modelem pro zlepšení procesů. Acronym DMAIC ukrývá anglicky spojení define-measure-analyze-improve-control, který znamená definice-měření-analýza-zlepšení-řízení. Tento postup akcí definuje 5 fází Six Sigma, který má za účelem zlepšení procesů. [37]

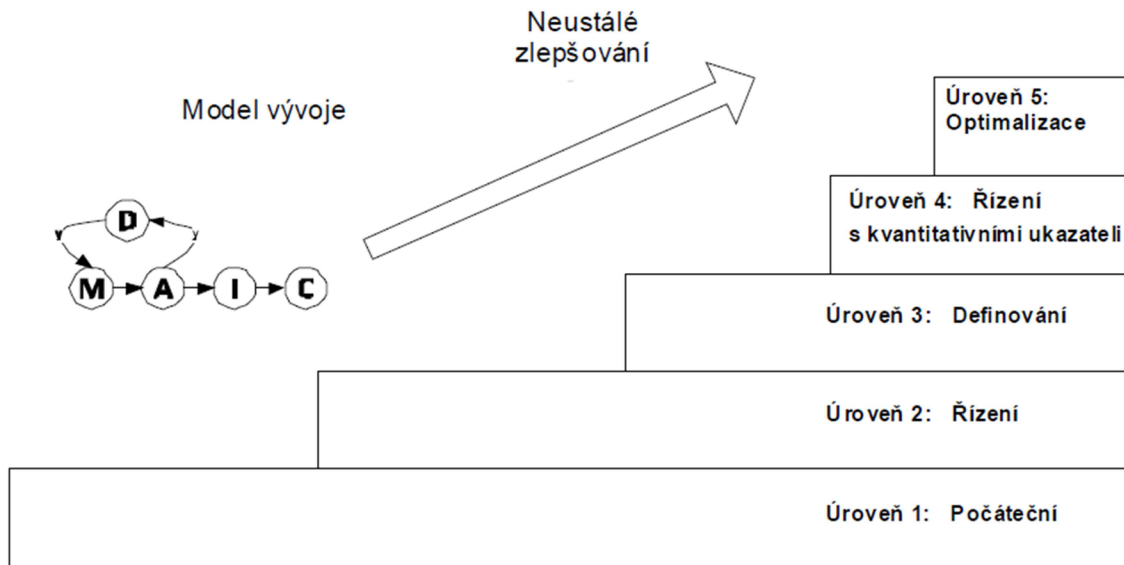
Jednotlivé fáze mají následovný náplň: [32,33,34]

- Define = Definování strategického problému a příležitosti na zlepšení, cílů a zákaznické očekávání. V této fázi se určí jaké vstupy a jak budou měřeny, analyzovány a jaké výsledky se očekávají. Často se používá Paretova analýza na identifikace největších vlivů.
- Measure = měření a určení výchozího stavu výkonnosti procesu, který má být zlepšen. V této fázi se zmapuje proces, sbírají se data a následně se hodnotí variabilita a způsobilost procesu a využívá se například metoda FMEA na určení nápravních opatření.
- Analyze = Analýzy procesu s cílem určit příčinu nízké výkonnosti. Návrh experimentu DOE pro prověření příčiny.
- Improve = Zlepšení procesu pomocí ověřených nápravních opatření, které byli nasazené kvůli identifikované příčiny s cílem zlepšit proces.
- Control = Standardizování zlepšeného procesu a zajištění trvalé a cyklické kontroly pro zabezpečení zvýšené výkonnosti, spolehlivosti nebo bezpečnosti pomocí robustního kontrolního plánu.

Tento model DMAIC lze použít v kterékoliv úrovni zralosti procesů v organizace, přičemž právě díky neustálému zlepšování je cílem organizaci dostat procesy na vrcholovou úroveň. Tyto úrovně jsou znázorněny na obrázku 21. V případě zavedení metody Six Sigma v organizaci se úroveň zralosti procesu neustále mění. Standardně se definuje 5 úrovní zralosti: [37]

- Úroveň 1 = počáteční: chybí popis procesu v organizaci;
- Úroveň 2 = řízení: proces existuje jen jako zákaznický požadavek, je pouze formalizován;
- Úroveň 3 = definování: veškeré procesy organizace jsou definovány;
- Úroveň 4 = řízen dle ukazatelů: všechny procesy v organizaci jsou kvantifikovány pomocí ukazatelů;

- Úroveň 5 = optimalizace: popsané procesy lze optimalizovat dle definovaných ukazatelů.



Obr. 21) Úrovně znalostí a postup neustálého zlepšování [37]

### 7.3 Nástroje metody Six Sigma

Nástroje metody Six Sigma doplňují hlavní myšlenku o minimalizaci variability a zajišťují, aby se nejpřesněji určili faktory ovlivňující výkonnost a zamezili šíření poruchy. Hlavním aspektem je, aby zákazník nedosáhl důsledky variability procesu. [32]

Mezi hlavní nástroje metody Six Sigma patří například: [32,33,37]

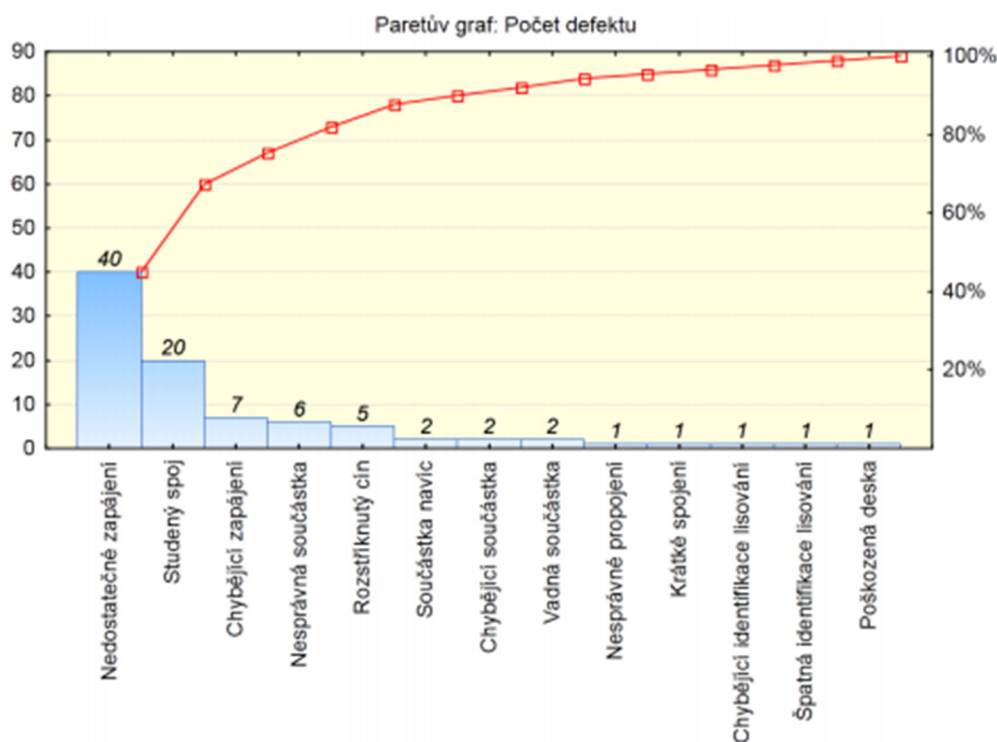
- Hlas zákazníka VOC, anglicky voice of customer, který je k určení základních očekávání zákazníka.
- Znaky považované za kritické z hlediska kvality CTQ, anglicky Critical to quality, které pomocí stromového diagramu přenáší široké potřeby zákazníků do podoby kritických znaků, přičemž identifikují znaky kvality potřebné pro další nástroje.
- SIPOC, anglický akronym vyjadřující supplier-input-process-output-customer, je diagram ke zjištění a identifikaci dodavatelů, vstupů, výstupů a zákazníku procesu, společně s detailním popisem samotného cílu procesu. Tato metoda je vstupem pro zmapování procesu.
- Procesní mapa P-MAP, zmiňované v některé literatuře jako Flow-chart, který zachycuje celý proces prostřednictvím vývojového diagramu.
- Statistické řízení procesů SPC, pomocí které je možné daný proces ověřit z hlediska variability a určit kontrolní meze, aby se zajistila požadovaná kvalita.
- Navrhování experimentů DOE, anglicky design of experiment, s cílem lepšího pochopení jak vstupy ovlivňují výstupy. Při DOE se definuje počet běhů a počet replikací, provede se experiment, analyzují se výsledky. Pro dosažení

statisticky významného výsledku je potřeba určit typ experimentu a definovat počet běhů a replikací.

- Analýza způsobilosti procesu, pomocí kterého se může odhadnout míra splnění zákaznických požadavků.
- FMEA
- Kontrolní plán CP
- Atd.

### 7.3.1 Pareto analýza

Analýza Pareto, nazývané taky pravidlo 80/20, je metoda na stanovení priorit a soustředění jen na problémy, či úspěchy, které metoda vyhodnotí jako významné. Metoda nese jméno italského ekonoma, Vilfréda Pareta, který v rámci svého objevu poukázal, že 80% bohatství v Itálii patří jen 20% občanům. Dle metody analýzy Pareto je formulovaná analogie, že za 80% problémů může 20% příčin. Příklad paretova diagramu je znázorněno na obrázku 22. [39]



Obr. 22) Paretův diagram [40]

Výstupem analýzy je takzvaný Paretův diagram, na kterém jsou znázorněny četnosti výskytu jednotlivých poruch. Tyto poruchy v diagramu jsou uspořádané zleva doprava v pořadí od nejčastějších až k nejméně častým a zobrazeny na ose x. Na ose y na levou stranu se vynesou počty reprezentující jednotlivé poruchy a na pravou stranu se zobrazí procenta. Pomocí křivky, někdy označovaná jako Lorenzova, se vynesou kumulativní součet

jednotlivých poruch, který se odečítá na pravé straně v procentech a na levé straně v počtech. [32,39]

Implementace a aplikace analýzy Pareto se provádí pomocí následujících 7 kroků: [39]

- 1) Stanovení místa analýzy – Určí se proces, který bude analyzován.
- 2) Shromáždění dat – Sbírají se data a záznamy se provedou do tabulky.
- 3) Příprava dat – Data se seřadí dle kritéria od největší až k nejmenším.
- 4) Vytvoření Lorenzovy křivky – Hodnoty u jednotlivých dat se kumulativně sečtou a vynesou se do grafu.
- 5) Určí se rozhodovací kritérium – Kritérium 80/20 není striktní, může se stát, že je potřeba modifikovat poměr pro dané účely.
- 6) Určí se hlavní faktory – Na základě rozhodovacího kritéria se vyberou pro další práci ty, kteří byli nejvýznamnější.
- 7) Definují se nápravní opatření – Pro vybrané faktory se definují akce k jejím eliminacím, nebo snížení.

### 7.3.2 DOE, aneb plánování experimentů

Návrh experimentů (DOE) je definován jako odvětví aplikované statistiky, která se zabývá plánováním, prováděním, analýzou a interpretací kontrolovaných testů za účelem vyhodnocení faktorů, které řídí hodnotu parametru nebo skupiny parametrů. DOE je výkonný nástroj pro sběr a analýzu dat, který lze použít v různých situacích. Umožňuje manipulaci s více vstupními faktory a určuje jejich účinek na požadovaný výstup. Manipulací s více vstupy současně může DOE identifikovat důležité interakce, které mohou chybět při experimentování s jedním faktorem najednou. Lze zkoumat všechny možné kombinace (plný faktoriál) nebo pouze část možných kombinací (zlomkový faktoriál). [41]

DOE je důležitou součástí Six Sigma, jelikož strategicky plánovaný a provedený experiment může poskytnout velké množství informací o vlivu na proměnnou odezvy v důsledku jednoho nebo více faktorů. Mnoho experimentů zahrnuje udržování určitých faktorů konstantních a změnu úrovně jiné proměnné. Tento přístup k procesním znalostem „jeden faktor v čase“ (OFAT) je však ne-flexibilní ve srovnání se současnou změnou více faktorů, při které se můžou zkoumat více složité interakce naráz. [41]

Mnoho současných statistických přístupů k navrženým experimentům pochází z práce R. A. Fishera na počátku 20. století. Fisher předvedl, jak si pomocí vážného zvážení a plánování návrhu a provedení experimentu před fyzickým pokusem pomohl vyhnout se častým problémům při analýze. Mezi klíčové koncepty při vytváření navrženého experimentu patří blokování, randomizace a replikace, které jsou rozebrány níže: [41]

- **Blokování:** Pokud je randomizace faktoru nemožná nebo příliš nákladná, blokování vám umožní omezit randomizaci provedením všech pokusů s jedním nastavením faktoru a poté všech pokusů s druhým nastavením.
- **Randomizace:** Odkazuje na pořadí, ve kterém jsou prováděny pokusy experimentu. Randomizovaná sekvence pomáhá eliminovat účinky neznámých nebo nekontrolovaných proměnných.



- **Replikace:** Opakování kompletního experimentálního postupu, včetně nastavení.

Metoda DOE se aplikuje při testování komplexních úkolů, u kterých je konečný výsledek dán kombinací mnoha faktorů. Jeho základ spočívá v testování kombinací různých hodnot (úrovní) faktorů, které mají vliv na daný proces. Jeho cílem je snížení počtu testovacích variant na primární z hlediska celkové kvality, čímž značně redukuje nutný počet testů. [42]

Aplikace metody DOE se dá popsat ve třech bodech: [41]

- 1) Nejprve je potřeba úplně porozumět vstupům a výstupům, které jsou zkoumány. Vývojový diagram procesu nebo mapa procesu mohou být užitečné pro pochopení funkcí a možných interakcí jednotlivých faktorů. Podle potřeby je vhodná konzultace s odborníky daného procesu.
- 2) Následně se určí vhodné měřítko pro výstup. Proměnlivá míra je vhodnější, přičemž bychom se měli vyhnout atributům, jako vyhovuje / nevyhovuje. Je potřeba se zajistit, že měřicí systém je stabilní a experiment opakovatelný.
- 3) Na konec se vytvoří návrhová matice experimentu pro zkoumané faktory, která zobrazí všechny možné kombinace vysokých a nízkých úrovní pro každý vstupní faktor. Tyto vysoké a nízké úrovně lze kódovat jako 1 a -1. Například dvou faktorový experiment, v tabulce č. 3, bude vyžadovat 4 experimentální běhy znázorněných tabulce č. 4.

Tab 3) Rozpis faktorů a úrovní [41]

Faktory	Úroveň nízká	Úroveň vysoká
Teplota	100°C	200°C
Tlak	3,5 bar	7 bar

Tab 4) Návrh 4 běhů dvoufaktorového experimentu [41]

Číslo experimentu	Teplota (faktor1)	Tlak (faktor2)
1	100°C	3,5 bar
2	100°C	7 bar
3	200°C	3,5 bar
4	200°C	7 bar

Následně pomocí výsledků z jednotlivých experimentů lze vypočítat účinek faktoru na daný výsledek zprůměrováním dat shromážděných na nízké úrovni a odečtením od průměru dat shromážděných na vysoké úrovni dle následujících vzorců: [41]

$$\text{účinek faktor} \otimes 1 = \frac{(Výsl. e. 3 + Výsl. e. 4)}{2} - \frac{(Výsl. e. 1 + Výsl. e. 2)}{2} ; \quad (67)$$

a

$$\text{účinek faktor} \otimes 2 = \frac{(Výsl. e. 2 + Výsl. e. 4)}{2} - \frac{(Výsl. e. 1 + Výsl. e. 3)}{2} ; \quad (68)$$

Interakci mezi dvěma faktory lze vypočítat stejným způsobem. Nejprve je třeba upravit konstrukční matici tak, aby ukazovala vysokou, a nízkou úroveň interakce. Úrovně se počítají vynásobením kódovaných úrovní vstupních faktorů působících v interakci, což je znázorněno v tabulce č. 5, a účinek interakce faktorů na výsledek se počítá dle následujícího vzorce: [41]

$$\text{účinek interakce faktorů} = \frac{(Výsl. i. 1 + Výsl. i. 4)}{2} - \frac{(Výsl. i. 2 + Výsl. i. 3)}{2} ; \quad (69)$$

Tab 5) Rozpis pro určení účinek interakcí na výsledek experimentu [41]

Číslo experimentu	Úroveň faktoru A	Úroveň faktoru A	Interakce
1	-1	-1	+1
2	-1	+1	-1
3	+1	-1	-1
4	+1	+1	+1

## 8 SYSTEMOVÝ ROZBOR PROBLEMATIKY

Systémový rozbor problematiky slouží pro komplexní uchopení daného tématu. V souvislosti s problematikou analýzy spolehlivosti procesu výroby průmyslových bezpečnostních přileb lze chápat jako souhrn všech záležitostí k pochopení vztahů a vzájemných zákonitostí jednotlivých částí analýzy a doplňkových metod pro určení stavu u procesu.

Tady je potřeba vyzdvihnout jednotlivé části potřebné k správnému posouzení procesu v následujících bodech:

- Základní požadavky na informaci o tématu, zejména z hlediska obecného jsou zpracovány v kapitole 2 a v jeho podkapitolách, kde jsou vytipovány základní typy spolehlivosti vzhledem k životnímu cyklu objektu.
- Podporné, ale důležité záležitosti, z hlediska základů matematických zákonitostí pro práci s údaji o spolehlivosti je vypracováno v kapitole 3 a v jeho podkapitolách, kde jsou vyjmenované druhy jevů a náhodných proměnných, v podrobnosti popsane nejčastější typy rozdělení pravděpodobnosti jak diskrétních, tak i spojitých náhodných proměnných a v neposlední řadě typické charakteristiky těchto proměnných.
- Popis úrovně spolehlivosti je potřeba určit kvantifikovaným způsobem pro objektivní hodnocení. Pro tento účel byly zvoleny ukazatele spolehlivosti, popsane v kapitole 4 a v jeho podkapitolách, pomocí kterých lze různé procesy zjednodušeně popsat z hlediska spolehlivosti.
- Základní princip, aplikace a využití, společně s postupem na aplikaci analýzy je zpracován v kapitole 5 a v jeho podkapitolách, které pojednávají také o různých variantách analýzy spolehlivosti v různých etapách vývoje životního cyklu a jejich možnosti použití. Tato část také podává informaci o různých druzích slabostí analyzovaných systémů, vhodnosti aplikace ukazatelů na určení nákladovosti životních cyklů.
- Obecný popis typů metod analýzy spolehlivosti a detailnější rozbor jejich nejvýznamnějších představitelů, analýzy stromu poruch a analýza způsobů a důsledků poruch, je popsán v kapitole 6 a v jeho podkapitolách, kde jsou rozebrány jejich propojení a hlavní rozdíly
- Rozbor metody Six Sigma, jeho historie a nástrojů této metody jsou popsane v kapitole 7 a v jeho podkapitolách, kde je také rozbor dvou jejich důležitých nástrojů, analýzy Pareto a plánování experimentů DOE.

Výše zmíněné body jsou základem pro pochopení problematiky analýzy spolehlivosti.

### 8.1 Legislativní a normativní požadavky na průmyslové bezpečnostní přilby

Základní regulace všech produktů na evropském trhu musí podléhat určitým požadavkům z důvodu ochrany zákazníků. V případě bezpečnostních přileb tento požadavek byl určen v Rozhodnutí Evropského Parlamentu a Rady číslo 768/2008/ES o společném rámci pro uvádění výrobků na trh a o zrušení rozhodnutí Rady 93/465/EHS a dalším požadavkem

speciálně ohledně OOPP Směrnice Rady 89/686/EHS o sblížení právních předpisů členských států týkajících se osobních ochranných prostředků, který byl v roce 2019 finálně nahrazen Nařízením EP a Rady (EU) 2016/425 o osobních ochranných prostředcích a o zrušení směrnice Rady 89/686/EHS. [43]

Toto nové nařízení definuje požadavky návrhů a samotné výroby OOPP dodávaných na společný Evropský trh, vlastním záměrem zajistit bezpečnost uživatelů a ochranu zdraví, přičemž zavádí pravidla pro volný pohyb pro tyto výrobky v Unii. Nařízení se zabývá i s jednotlivými moduly postupů posuzování shody, kde pro náš případ bádání z hlediska průmyslových bezpečnostních přileb je zvolen postup pro kategorii rizika 2, který podléhá postupu posuzování shody typem založené na interním řízení výroby spolu s kontrolami výrobků pod dohledem v náhodně zvolených intervalech dle modulu C2. Pro použití nových požadavků a předpisů bylo stanoveno přechodné období tak, aby výrobci OOPP a instituce dozoru nad trhem, zejména notifikované osoby a akreditované orgány, měli dostatek času na splnění nových požadavků. Principálně se jedná o závazný evropský právní předpis, na který se dále navazují další evropské normy, ovšem nezávazné. [43]

## 8.2 Normativní požadavky na průmyslové bezpečnostní přilby

Z hlediska technických požadavků je nezbytně nutné se zmínit o platné normě ČSN EN 397+A1:2013, s názvem Průmyslové ochranné přilby, která stanovuje fyzikální požadavky, požadavky na provedení, dále zkušební metody a požadavky na značení pro průmyslové ochranné nebo bezpečnostní přilby. Tato norma specificky definuje určení, a to zejména z hlediska poskytování ochrany uživatele těchto přileb, ochrana proti padajícím předmětům. [44]

Dle normy ČSN EN 397+A1:2013 požadavky na průmyslové ochranné přilby můžeme rozdělit na 4 druhy: [44]

- Fyzikální požadavky, které definují minimální sestavu, ze kterého se musí skládat přilba, materiálové požadavky, zejména z hlediska alergické nezávadnosti částí, které přicházejí do styku s pokožkou. Dále požadavky na materiály, možnost nastavení bez náradí, zabezpečení proti nesprávnému seřízení, fyzických ochranních vzdáleností mezi skořepinou a náhlavní opěrou, potní pásek, podbradní pásek, větrání a příslušenství.
- Požadavky na provedení, které lze dělit na povinné a nepovinné. Mezi povinné požadavky patří zejména dvojice důležitých požadavků, a to tlumení nárazu a odolnost proti průrazu. Dále mezi povinné požadavky je zařazen odolnost proti plameni, odolnost upevnění podbradního pásku a štítek. Mezi nepovinné požadavky patří přízpusobení do velmi nízkých a vysokých teplot, elektrické vlastnosti, příčná deformace a postřík roztaveným kovem.
- Zkušební požadavky, podmínky a postup klimatizování vzorků před zkoušením, zkušební zařízení, zkušební prostředí, maketu zkoušecí hlavy a samozřejmě princip, zařízení a postup jednotlivých zkoušek.

- Požadavky na značení, kteří definují potřebné značení na přilbách, na balení a údaje a dokumenty potřebné k používání, zejména uživatelský manuál.

Požadavky týkající se provedení a zkoušení budou značně důležité v další části diplomové práce.



## 9 NÁVRH A ZPŮSOB ŘEŠENÍ

Posouzení spolehlivosti je těžký úkol, zejména v případě procesu, ve kterém je příliš mnoho variant a neznámých, nebo nepotvrzených faktorů, které mohou daný proces ovlivnit.

Návrh analýzy spolehlivosti a výběr vhodných metod tohoto posouzení je celkově popsán v kapitole 10 a v jeho podkapitolách podle následujících bodů:

- Nejdříve byl vybrán cílový proces, který reprezentuje značný podíl výroby společnosti a pomocí informací z podniku byla sestrojena procesní mapa procesu výroby a testování průmyslových bezpečnostních příleb, která společně s informacemi výkonnosti stávajícího procesu slouží jako základ pro další analýzu. Toto je zpracováno v kapitole 10.2.
- Následně byl tento proces zhodnocen a představené cíle jednotlivých ukazatelů pro popis procesu výroby a testování průmyslových bezpečnostních příleb. Toto je zpracováno v kapitole 10.3.
- Pak pro rozbor posbíraných dat ohledně různých poruch byla zvolena metoda Paretova analýzy pro určení hlavních přispěvatelů, které způsobují největší zmetkovitost, což je zpracováno v kapitole 10.4.
- V následující kapitole 10.5 pak byla provedena kontrola procesu a jeho jednotlivých parametrů, což částečně potvrdili problémovou oblast procesu a byla zvolena metoda plánování experimentů DOE pro potvrzení podezření některých nejasných příčin společně s diagnostikou problémové oblasti procesu a sumarizací příčin hlavních poruch.
- Na závěr byli tyto poznatky zapracované do FMEA jak konstrukční, tak i procesní pro možnost adresování těchto poruch s důrazem na jejich příčiny pomocí nápravních řešení a akcí zpracované v kapitole 10.6

V poslední řadě přínosy a vhodnost aplikace vybraných metod byla vyjádřena v kapitole 10.7.





## 10 ANALÝZA SPOLEHLIVOSTI PROCESU VÝROBY PRŮMYSLOVÝCH BEZPEČNOSTNÍCH PŘILEB

V praktické části práce je za účelem hlubšího pochopení souvislostí nejdříve představen podnik PLS, s.r.o., dále jen PLS (fiktivní název, skutečné název společnosti nemohl být z důvodu ochrany vnitropodnikových dat zveřejněn), činnost podniku, produktové portfolio týkající se výroby komponentů osobních ochranných pracovních pomůcek, průmyslových bezpečnostních přileb, tržní postavení.

V další části rozvinu současný stav výroby těchto produktů, popis procesu pomocí ukazatelů výkonnosti a spolehlivosti, následně cílový stav u tohoto procesu, systémový rozbor pomocí Pareto analýzy, DOE. Dále vytvořím DFMEA a PFMEA pro přílbu a doplním o posouzení vhodnosti těchto nástrojů a návrhu nápravních opatření s cílem zlepšení spolehlivosti, bezpečnosti a výkonnosti výrobního procesu, ale také samotného výrobku.

### 10.1 Základní údaje o společnosti PLS s.r.o.

Společnost PLS je právní formou společnost s ručením omezeným vedeným jedním jednatelem. Majitelem společnosti je nadnárodní korporát působící v oblasti výroby gumových a plastových výrobků v Evropě. Společnost je držitelem certifikátu ISO 9001 a IATF 16949 jelikož dodává výrobky i do automobilového průmyslu. V současné době ve společnosti pracuje 31 zaměstnanců, ze kterých 11 je administrativních pracovníků a zbytek 20 je pracovníků výroby z různých oddělení. Přestože se jedná o relativně malý podnik, společnost může vykázat roční výnos 2,7 miliónů Eura.

Podnik, založen v roce 2006, je zaměřen na výrobu a prodej gumových a plastových výrobků do různých průmyslových odvětví jak je automobilový průmysl, hračkářský průmysl, potravinářský průmysl a výroba plastových komponentů a výrobků osobních ochranných pracovních prostředků, dále jen OOPP. PLS z odvětví OOPP vyrábí zejména komponenty, ale i celé produkty pro ochranu dýchacích orgánů, pro ochranu hlavy, pro ochranu očí a obličeje a pro ochranu sluchu, znázorněno na obrázku 23.



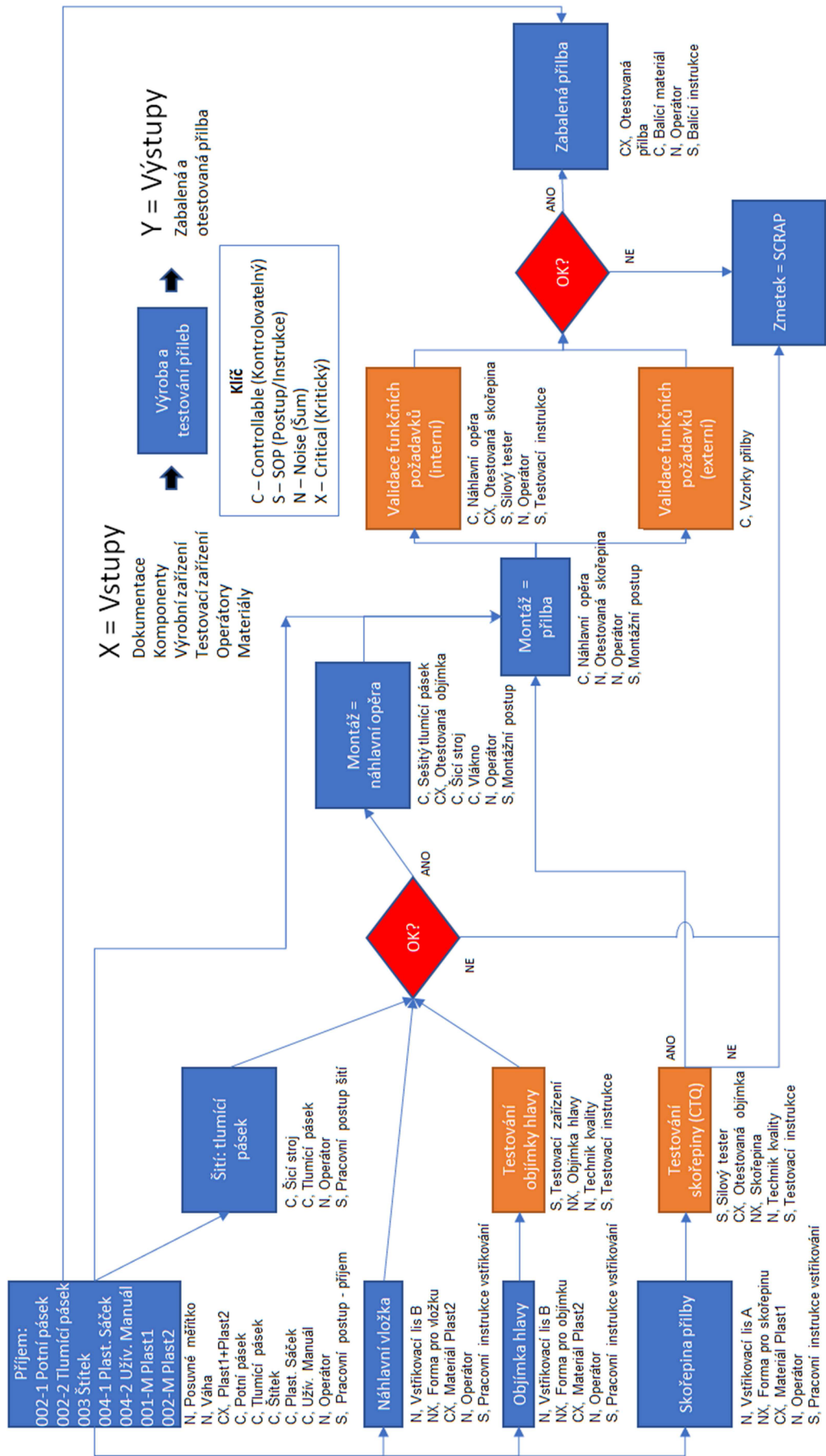
Obr. 23) Ilustrační znázornění možného produktového portfolia OOPP [45]

Nejvyšší podíl výroby zabere jednoznačně výroba bezpečnostních přileb a výroba komponentů pro obličejové štíty, hlavně jejich upínací náhlavní pásy. Pro tyto účely společnost disponuje různými druhy vstřikovacích lisů, dále jen vstřikolisů pro plast a gumy v rozsahu tlaků 50 až 400 tůn reprezentovány od profilových extruderů, přes vstřikolisy středních velikostí pro univerzální použití, až k vstřikolisům větších ráží, převážně používaných pro automotive výrobky objemnějších rozměrů. Společnost PLS sám nedisponuje oddělením vývoje, tzv. R&D a potřebné úkony ohledně vlastních produktů řeší mateřská společnost v případě výroby výrobků, kde návrh konstrukce je vlastněna firmou.

## 10.2 Popis současného procesu výroby přileb

Od začátku působení společnosti PLS je výroba průmyslových ochranných přileb nedílnou součástí portfolia výroby. Aktuálně výrobní kapacitu společnosti ohledně průmyslových ochranných přileb reprezentuje jeden 150 tunový vstřikolis s jednou lisovací formou pomocí jedné kavity v případě skořepiny, v případě náhlavní opěry další vstřikolis, ovšem menší 50 tunový, s menší lisovací formou. Dále krom těchto aktivit další důležitou část procesu výroby reprezentují operace šití a montáže, které ovšem z hlediska analýzy nebudeme řešit do detailu.

Proces výroby průmyslových ochranných přileb je zobrazen na procesní mapě níže na obrázku 24, které bylo vytvořeno dle interních předpisů společnosti PLS s důrazem na tok materiálů a typů hodnot, které jsou reprezentovány v procesu. Procesní mapa byla vytvořena týmem tvořena procesním inženýrem, inženýrem kvality a vedoucími výroby jednotlivých pracovišť. Tento proces v případě výroby průmyslových ochranných přileb není reprezentován pouze výrobními kroky, ale součástí je i příjem materiálu, šicí proces, který částečně je součástí celkového procesu montáže a jako nejdůležitější výrobní testování pro účel ověření a zabezpečení nezávadnosti výrobků.



Obr. 24) Mapa procesu výroby a testování přilby [46]

Víceúrovňový kusovník produktu průmyslová ochranná přilba je v tabulce 6 níže:

Tab 6) Přehled jednotlivých částí přilby [46]

Číslo	Název	Zákl. Operace
001	Skořepina	vstřikování
001-M	Plast 1	přejímka
002	Náhlavní opěrka	montáž
002-M	Plast 2	přejímka
002-1	Potní pásek	přejímka
002-2	Tlumicí pásek	přejímka
002-3	Náhlavní vložka	vstřikování
002-4	Objímka hlavy	vstřikování
003	Štítek	přejímka
004	Balící materiál	balení
004-1	Plastový sáček	přejímka
004-2	Uživatelský manuál	přejímka

Pro účel analýzy počátečního stavu byli vybráni data z roku 2018/2019 od Října 2018 až do Března 2019, jelikož se očekávalo změna se zavedením nového nařízení EP a Rady (EU) 2016/425, který se stal samostatně platným v dubnu 2019. Tyto změny měly vliv také na fyzickou podobu produktu, jelikož byla potřeba modifikovat značení na skořepině, na štítku a také v uživatelském manuálu.

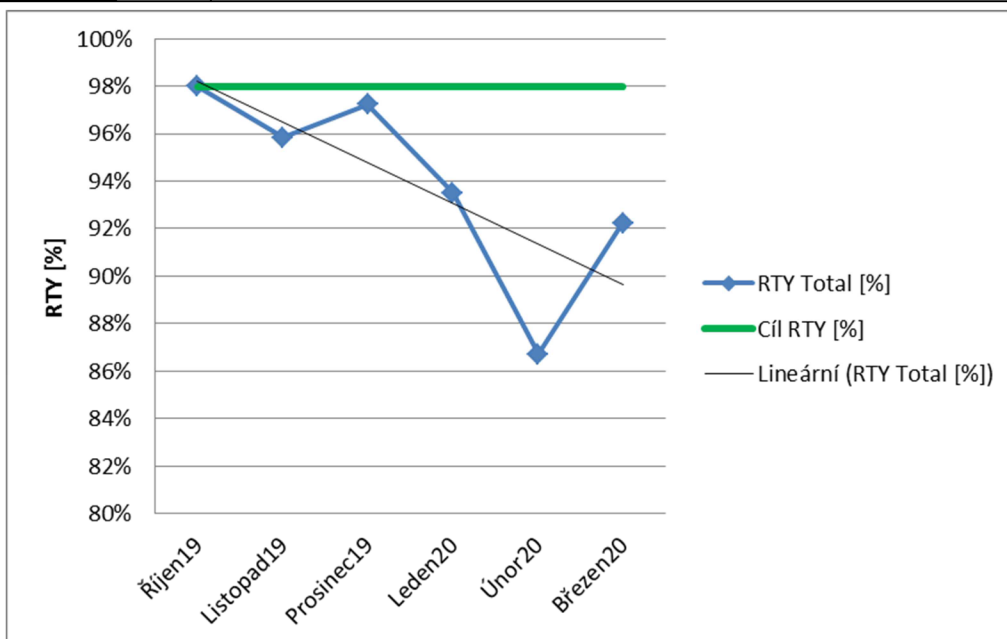
Data ohledně ukazatelů výkonnosti celého procesu jsou znázorněny v tabulce 7, kde můžeme vyčíst následující informace:

Tab 7) Přehled ukazatelů výkonnosti [46]

	Říjen19	Listopad19	Prosinec19	Leden20	Únor20	Březen20
<b>RTY Total [%]</b>	98%	96%	97%	93%	87%	92%
<b>DPU Total [%]</b>	0%	1%	1%	2%	3%	2%
<b>DPO Total [%]</b>	0%	0%	0%	0%	0%	0%
<b>DPMO Total [ppm]</b>	550	1171	780	1883	3843	2198
<b>6σ level</b>	4.76	4.54	4.66	4.39	4.16	4.34

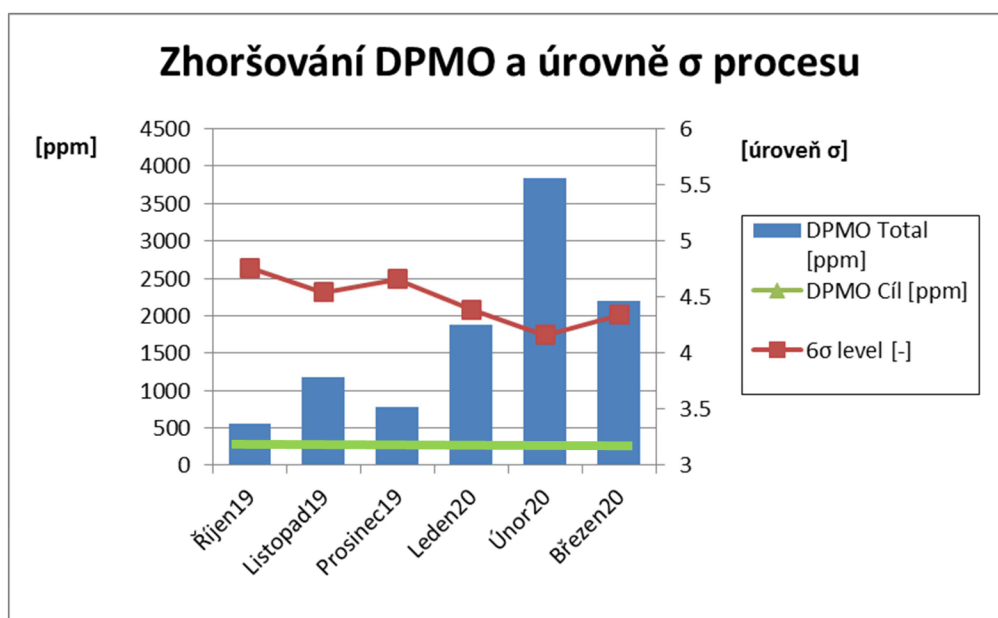
### 10.3 Definice cílů procesu ohledně výkonnosti, kvality a spolehlivosti

Je vidět klesající trend RTY z dat, znázorněno na obrázku 25, který lze odůvodnit zvýšenou fluktuací operátorů výroby vlivem nových pracovních příležitostí v okolí (3 nové zaměstnavatele v okolí). Cílová hodnota RTY je společností stanovena na 98%. Na ose x jsou vyznačené jednotlivé měsíce a na ose y je RTY pro jednotlivé měsíce v procentech. Závěrem nelze říct, že tyto výsledky jsou způsobené pouze více zmíněným vlivem, jelikož bylo možné vyzorovat určitý trend zhoršování FPY vstřikování a testování skořepiny, ale také testování finálních výrobků, které mají značný vliv na celkovou výkonnost výroby a testování průmyslových ochranných přileb.



Obr. 25) Klesající trend RTY Říjen18-Březen19 [46]

Dále je možné vypočítat zhoršování DPMO, které ukazují, že vad na milion příležitostí značně přibilo. Tento nežádoucí trend se projevil také na ukazatele  $\sigma$  celého procesu znázorněno na obrázku 28, kde na svislé ose jsou vyznačené měsíce, na hlavní svislé ose úroveň DPMO v jednotkách vad na milion příležitostí a na vedlejší svislé ose trend  $\sigma$  celého procesu výroby a testování, přičemž cílová hodnota DPMO je stanovena na 250ppm, která ještě nebyla nikdy dosažena.



Obr. 26) Počáteční stav DPMO a  $\sigma$  procesu výroby a testování přileb [46]

Cíle z hlediska kvality a spolehlivosti byli stanoveny na základě požadavků normy na nulové selhání kvůli zajištění spolehlivého a bezpečného produktu.

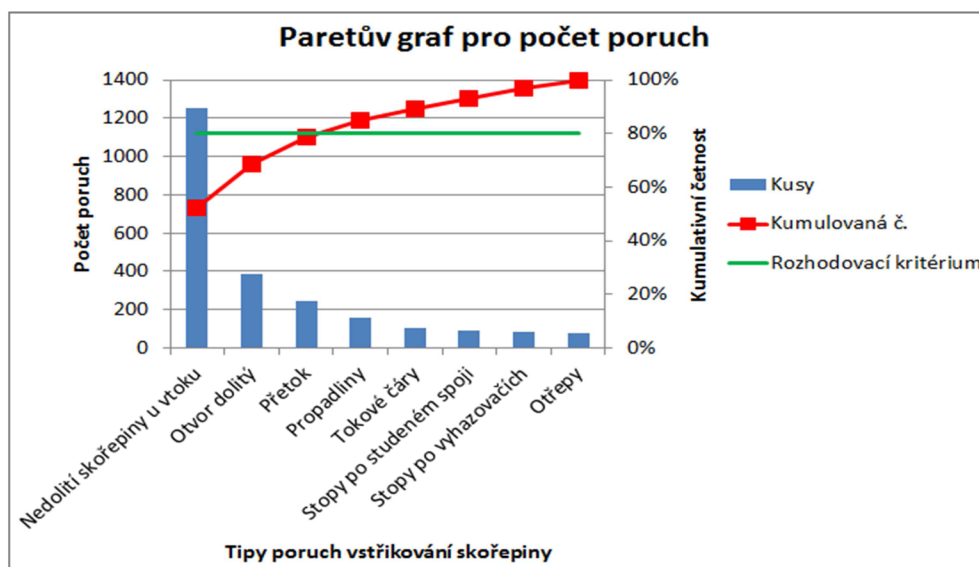
## 10.4 Analýzy poruch pomocí Paretova grafu

Jak lze vidět na grafech výše, samotné zhoršování těchto důležitých parametrů již mělo iniciovat zásah do procesu, které v určité míře byli vykonáni, ale ne na dostatečné úrovni a ne dostatečně detailně od začátku objevu problémů. Důvodem pro toto rozhodnutí byla potřeba výroby bezpečnostních skladových množství, kvůli plánované změně formy, která by výrobu zastavila.

Z dat vypořizovaných za toto a předešlé období byl současně vytvořen plán s cílem pro zvýšení produktivity a snížení zmetkovitosti, kvůli které se inicializovalo sběr dat zmetkovitosti přesnějším způsobem pro možnost identifikace hlavních problémů, které měli za následek zhoršení stavu. Byl vyjmenován tým, na sběr a rozhodování ohledně dat, sestaven z techniků a inženýra kvality, z týmů procesních inženýrů, z produktového inženýra a z manažera výrobního oddělení. Data byli sbíráni na denní bázi, seskupení do měsíčních reportů kvůli jednodušší práce. Cílem této skupiny bylo vytipování nejvýznamnějších faktorů, které měli vliv na nedostatečné výsledky procesu výroby a testování.

Prvotně se sesbíraly data všech poruch, které způsobovali zmetky ve výrobě a sečetli se dle jednotlivých počtů těchto poruch. Z dat bylo zřejmé, že největší váhu mají problémy ohledně vstřikování skořepiny, tím pádem se soustředilo na poruchy tohoto kritického subprocesu. Do součtu se nezapočítal vliv oprav, opravené kusy se počítali taktéž do součtu, podle jaké vady se opravovali na objektu. Zvlášť se hodnotily zmetky z důvodů výrobních poruch a zvlášť se hodnotily zmetky z důvodů nesplnění funkčních testů. Dále se počítala každá porucha na každém kontrolovaném objektu.

Následně proběhlo vyhodnocení těchto dat pomocí Paretovy analýzy, která poukázala, že největší váhu mají poruchy nedolítí skořepiny u vtoku, která tvoří víc než polovinu všech poruch, následně dolítí otvoru pro podbradní pásek a přetoky v místě vtoku. Paretoův graf s typy poruch zobrazující počet jednotlivých poruch a rozhodovací kritérium vyvolání nápravních opatření je znázorněn na obrázku 27.



Obr. 27) Paretoův graf pro poruchy vstřikování skořepiny [46]

## 10.5 Plán pro určení příčin poruch a definování nápravních opatření

Poruchy identifikované pomocí Paretova analýzy poukázali, že příčina, nebo příčiny jsou spojené s parametry nastavení vstřikolisu nebo s formou přilby. Na základě těchto poznatků byly zkontrolovány následující parametry a záležitosti spjaté s procesem:

- Příjem materiálu na vstřikování přilby: Materiály byli zkontrolováni dle požadavků kusovníku, a nebyli nalezeni žádné neshody.
- Skladování materiálu na vstřikování přilby: Skladové zásoby materiálů byli zkontrolovány dle požadavků dopňkových informací definovaných výrobcem a dodavatelem plastových peletů. Byla zkontrolována teplota a vlhkost ve skladovacích prostorech, která taktéž nevykazovala žádné odchylky od povolených skladovacích parametrů.
- Předpříprava materiálů: Plastové pelety používané na vstřikování přilby se musí před použitím ve stroji vysušit pomocí takzvané makromolekulární sušičky. Odlišné nastavení sušení, než předepsáno výrobcem základního materiálu, může značně ovlivnit vlastnosti vylisku, dokonce změnit jejich fyzické a mechanické vlastnosti. Po zkontrolování kalibrace sušičky a porovnání nastavení parametrů sušení byla nalezena odchylka v teplotě sušení. Odchylka samotná byla nepatrně na krajní dolní hodnotě doporučené teploty pro vysoušení materiálu.
- Parametry vstřikování: Byli zkontrolovány parametry vstřikování vůči kontrolnímu seznamu parametrů specifické pro danou formu a typ materiálu. Hodnoty vstřikovacích tlaků (špičkový tlak, dotlak, a zpětný tlak takzvaný „cushion“), rychlosti vstřikování (čas vstřikování, rychlost šroubu a celkový čas plnění) a velikost dávky na jeden cyklus neukazovali žádné rozlišnosti. Na druhou stranu uzamykací síla vykazovala razantní spád během přepínání na dotlak, kerou může způsobit netěsnost formy, nebo porucha vstřikovacího ventilu. Dále na základě kontroly bylo odhaleno taky, že vstřikovací teploty nastavené na stroji neodpovídaly a byli ve skutečnosti patrně vyšší, než nastavení ukázalo. Toto bylo odhaleno pomocí dotykového termočlánku a diagnostické techniky externí společnosti. Pomocí termokamery bylo taky odhaleno, že povrchová teplota formy byla značně vyšší, než doporučená hodnota teploty výrobcem plastových peletů.
- Vstřikovací forma: Vlivem okolností na dodávky a urgenci vytvoření bezpečnostních skladochých zásob pro překonání doby úprav forma nebyla rozebrána a zkontrolována, ale bylo provedené oddělení formy of stroje pro účel zkontrolování přípojných konektorů a základnic. Oddělení formy odhalilo nadměrnou korozy u výstupu chladicího okruhu formy, která byla zapříčiněna zatékáním do formy a únikem chladicí kapaliny, která může způsobit zvýšení teploty formy, způsobující zvýšení povrchové teploty dané kavity. Tento únik byl taky potvrzen zápisem oddělení údržby, kde pro danou formu byla zazanamenána doplnění chladicí kapaliny vyšší než u jiných forem.

Pro odhad a částečné potvrzení možných podezřelých příčin, bylo sestaveno dvoufázové plánování experimentu DOE s cílem objasnit interakce jednotlivých možných příčin. Prvotně byla adresovaná vyšší teplota parametrů, pro které byl faktor 1 nastaven do pozic současných teplot a také vyšších teplot (pomocí ohřívání a rychlosti šroubu ve válci). Následně byl zvolen faktor 2 ve formě současné nižší teploty sušení a vyšší úroveň reprezentující teplota dle doporučení výrobce materiálu.

Tab 8) Faktory a úrovně pro DOE [46]

Nejvýznamnější Faktory	Úroveň -	Úroveň +
1.Teploty vstřikování (válec a tryska)	X-30°C	X°C (aktuální)
2.Teplota sušení	Y°C (aktuální)	Y+20°C

Na základě těchto faktorů byl navržen DOE, zobrazen v tabulce 9 s následujícími požadavky:

- Každá sada bude obsahovat 40 vzorků.
- Parametry kromě teploty vstřikování a teploty sušení se nebudou měnit (výjimka: pro dosažení očekávaných teplot v různých sektorech válce se může použít změna rychlosti šroubu).
- Pro každou sadu parametrů se použije takzvaný „cut-off“ dle doporučení technologa minimálně 20 kusů skořepin.
- Sušička nebude plná při začátku vstřikování, ale zásoba v nádrži bude nastavena na jednu čtvrtinu kapacity – důvodem je předejít přesušení materiálu vlivem přenastavení z jedné sady parametrů na druhou.
- Následně vzorky budou analyzovány pomocí třech kritérií:
  1. Zkoumání a četnost poruch v oblasti vtoku a úchytů pro každou sadu parametrů.
  2. Otestování 20 kusů po klimatizování na velmi nízké teploty dle normy (4 hodiny) na test tlumení nárazu s požadavkem, že síla přenesená na hlavovou formu nemůže být vyšší než 5kN.
  3. Otestování 20 kusů po klimatizování na velmi nízké teploty dle normy (4 hodiny) na test odolnosti proti proražení.

Tab 9) DOE s výsledky zkoumání [46]

Experiment	Faktor1	Faktor2	Interakce	Poruchy [-]	Střední hodnota přenesené síly [N]	Odolnost proti proražení [počet selhání]
1	-	-	+	8	3582	4
2	-	+	-	2	3399	0
3	+	-	-	18	3724	11
4	+	+	+	10	3625	7



Výsledky DOE byli analyzovány, ale nepoukázali na významnou interakci mezi faktory 1 a 2, jak je i znázorněno dle analýzy interakce pomocí softwaru Minitab na obrázku 28 pro výslednou sílu přenesenou na hlavovou formu. Výsledky poukázali pouze na to, že Faktor 1 nejvíce ovlivňuje proces vstřikování, což potvrzují dodatkovou poruchu zvýšeného rezu v chladicím kanálu a také zvýšené teploty povrchu formy, ale neměli souvislost s hlavní poruchou nedolití skořepiny u vtoku.



Obr. 28) Interakce faktorů 1 a 2 dle softwaru Minitab [46]

Výpočet vlivu Faktoru 1, Faktoru 2 a interakce faktorů 1 a 2 na výslednou sílu je vypočítáno níže pro ukázkou:

$$\text{účinek Faktor} \square 1 = \frac{(3724 + 3625)}{2} - \frac{(3582 + 3399)}{2} = 184 [N] ;$$

$$\text{účinek Faktor} \square 2 = \frac{(3399 + 3625)}{2} - \frac{(3582 + 3724)}{2} = -141 [N] ;$$

$$\text{účinek interak} \square \text{faktorů} = \frac{(3582 + 3625)}{2} - \frac{(3399 + 3724)}{2} = 42 [N] ;$$

Na základě výsledků byla forma po vyrobení dostatečné úrovně bezpečnostních skladových zásob a byla odhalena porucha v chladicí soustavě způsobená prasklinami vlivem teplotního namáhání a také bylo odhaleno netěsnost vstřikovacího ventilu na pevné části formy.

Výsledky analýzy a jednotlivé nápravní opatření jsou popsány níže:

- Pozorování ohledně odlišností teplot sušení byli způsobeni lidským faktorem, jelikož při sestrojování teplotní tabulky pro operátory byla zapříčiněná chyba nevhodným záznamem. Tyto údaje sušících teplot byli zrevidováni a v případě odlišných údajů od doporučení dodavatele nebo výrobce materiálu změněny na správné údaje.
- Vyšší teplota na povrchu formy byla způsobená prasklinami v chladícím okruhu na formě, přičemž únik chladicí kapaliny nebyl na první pohled vidět. Jako nápravné opatření oddělení údržby a technologie odstranila vyvařením a následným vybroušením praskliny, aby chladicí okruh odpovídal požadavkům technické specifikaci. Abychom se předešla podobným poruchám v budoucnosti, byl odsouhlasen požadavek na sestavení plánu údržby forem, který doposud chyběl a požadavek byl zaznamenán do vytvořené PFMEA přílby.
- Vysoké teploty taveniny v systému, které neodpovídali doporučením výrobce plastového materiálu, byly zrevidovány a nahrazeny sadou parametrů z druhého běhu plánování experimentu DOE. Požadavky na kontrolu a záznam těchto parametrů byli zadáni do PFMEA přílby.
- Významný pokles tlaku uzamknutí v průběhu dotlačování vstříknuté směsi byl způsoben již odhalenou netěsností vstříkovacího ventilu, kde docházelo k zpětnému úniku materiálu do vstříkovací soustavy, což způsobilo následující následky nedolití materiálu u vtoku, což společně s přehřátým materiálem způsobilo snížení hustoty materiálu v okolí vtoku. Vlivem těchto problémů byli přílby více náchylné u testování odolnosti prorazení. Požadavek na nápravu chybějící regulérní kontroly vstříkovacího ventilu a soustavy byl zaznamenán do PFMEA přílby a zařazen do plánu údržby formy.

## 10.6 DFMEA a PFMEA přílby a jejich zhodnocení

Jelikož přílba řešená v tomto případě byla staršího typu, dokumentace v podobě DFMEA a PFMEA nebyla k dispozici a bylo potřeba jej vytvořit. Z hlediska hodnocení těchto FMEA byl použitý následující hodnotící tabulka používaná společností znázorněno v tabulce 10.

Tab 10) Tabulka hodnotících kritérií pro FMEA [46]

Skóre	Obecně	Závažnost	Z hlediska spolehlivosti
10	Velmi vysoká	Vyhrazeno pro bezpečnostní nebo regulační poruchy, ke kterým může dojít bez varování	Katastrofické selhání. - Výměna celého systému.
8	Vysoká	Ztráta nebo zhoršení primární funkce / kritická ztráta výkonu.	Selhání produktu. - MTTR < jeden měsíc.
6	Mírná	Ztráta nebo zhoršení sekundární funkce / ztráta výkonu.	Selhání, které má za následek sníženou průchodnost procesem.
4	Nízká	Nepříjemnost v důsledku funkce / ztráty funkce.	Porucha, která vyžaduje reset nebo recalibraci nástroje.

1	Velmi nízká	Žádný nežádoucí vliv funkce / ztráty funkce.	Porucha, která nemá vliv na výkon systému.
<b>Skóre</b>	<b>Obecně</b>	<b>Výskyt</b>	<b>Z hlediska spolehlivosti</b>
10	Velmi vysoká	Možná šance	Pravděpodobně nastání - denně nebo každou hodinu.
8	Vysoká	10% < O < 20%	Pravděpodobně nastane během jednoho měsíce provozu.
6	Mírná	5% < O < 10%	Pravděpodobně nastane během jednoho roku provozu.
4	Nízká	1% < O < 5%	Pravděpodobně nastane během životnosti systému.
1	Velmi nízká	< 1%	Nepravděpodobná pravděpodobnost, že nastane během životnosti systému.
<b>Skóre</b>	<b>Obecně</b>	<b>Detekce</b>	<b>Z hlediska spolehlivosti</b>
10	Velmi nízká	Žádný formální inspekční krok nebo neformální příležitost ke zjištění události.	Žádná schopnost detekovat, než k tomu dojde, a / nebo nějaká schopnost detekovat poté.
8	Nízká	Žádný formální inspekční krok nebo neformální příležitost odhalit v určitém okamžiku procesu.	Žádná schopnost detekovat, než k tomu dojde, ale určitá schopnost detekovat poté.
6	Mírná	Alespoň jeden formální krok procesu detekce.	Žádná schopnost detekovat, než k tomu dojde, ale dobrá schopnost detekovat poté.
4	Vysoká	Alespoň jeden formální krok procesu detekce, popřípadě inspekce k detekování.	Nějaká schopnost detekovat, než k tomu dojde, a dobrá schopnost detekovat poté.
1	Velmi vysoká	Formální proces zaveden k odhalení a detekce.	Je velmi pravděpodobné, že se zjistí dříve, než k tomu dojde.

Vypracovaná DFMEA je zobrazena na obrázcích 29, 30, 31 a 32. Následně vypracovaná PFMEA je zobrazena na obrázcích 33, 34, 35, 36, 37.

Při řešení požadavku na vytvoření DFMEA a PFMEA na výrobu a testování průmyslových ochranných přileb se pracovalo v týmu třech, až čtyřech lidí. Sice požadavek a metodologie na vypracování analýzy FMEA vyžaduje větší počet lidí, v relativně malé společnosti a při souběžných jiných zodpovědnostech bohužel nebylo místo. Během řešení problematiky a vyhodnocování DFMEA a PFMEA v rámci této diplomové práce se přišlo na 39 dodatečných možných vzniků vad, které byly adresované v řízených změnách, ve iniciaci vytvoření plánu údržby pro vstřikovací formy a v dodatečných kontrolních bodech v kontrolním plánu.

DFMEA - Přilba																	
Název produktu:		Průmyslová ochranná přilba		Číslo produktu:		P100		Vypracováno (tým FMECA)		QE, DE, PE, QT		Quality Engineer Design Engineer Product Expert Quality Technician					
FMECA moderátor:		QE		Produktový expert		PE		Datum platnosti:		05/22/2019		Revize:		Rev A			
Číslo vstupu	Bod	Funkční požadavek produktu	Režim potenciálního selhání	Potenciální následek	ISEV	Příčina	IOCC	Aktuální kontrola	IDET	IRPN	Doporučené akce	Zodpovědné oddělení	Přijatá opatření	pSEV	pOCC	pDET	pRPN
1	Náhlavní vložka	Montáž	Vložku nejde namontovat na objímku hlavy.	Volžka nebo objímka hlavy se můžou deformovat a tím snížit funkci odpružení.	8	Nedostatečné připojení vložky k objímce kvůli širokému uchu.	1	Porovnání požadavků na rozměry na základě 3D CAD modelu.	4	32							0
2	Objímka hlavy	Vnímaná kvalita	Objímku hlavy nelze zafixovat.	Zrátá funkce retence/držení na hlavě.	10	Koliky pro úpravu velikosti na objímce jsou příliš silné / otvory jsou příliš úzké.	4	Porovnání požadavků na rozměry na základě 3D CAD modelu.	4	160							0
3	Objímka hlavy	Vnímaná kvalita	Objímku hlavy nejde nastavit na požadovanou velikost.	Zrátá funkce retence/držení na hlavě.	6	Koliky pro úpravu velikosti na objímce jsou křehké/měkké.	4	Materiálové požadavky v seznamu specifikací.	6	144							0
4	Tlumicí pásek	Montáž	Textilní pásek není správně přišitý.	Nepříjemnost pro uživatele a možná ztráta funkce.	10	Nesprávná nit použita.	1	Kontrolní seznam nastavení šicího stroje.	8	80							0
5	Tlumicí pásek	Montáž	Textilní pásek není správně přišitý.	Nepříjemnost pro uživatele a možná ztráta funkce.	10	Slabá nit.	1	Materiálové požadavky v seznamu specifikací.	8	80							0
6	Tlumicí pásek	Montáž	Textilní pásek není správně přišitý.	Nepříjemnost pro uživatele a možná ztráta funkce.	10	Nesprávný vzor šití.	1	Kontrolní seznam nastavení šicího stroje.	6	60							0
7	Tlumicí pásek	Montáž	Textilní pásek není správně přišitý.	Nepříjemnost pro uživatele a možná ztráta funkce.	10	Neuplný vzor šití.	1	Vstupní kontrola při montáži.	8	80							0
8	Tlumicí pásek	Montáž	Textilní pásek je příliš dlouhý.	Zrátá funkce retence/držení na hlavě.	10	Nesprávné zafixování určené délky pásku při šití.	1	Přípravek na zafixování délky.	6	60							0
9	Potní pásek	Pohodlí a přizpůsobení	Suchý zip nedrží, čím Potní pás nedrží na objímce hlavy.	Nepříjemnost pro uživatele.	6	Lepicí podklad na suchý zip neodolá každodenním používáním a / nebo čištění.	6	-	4	144	Stitch the velcro in place (změna ceny).	Odd. Kons. / Odd. Prodeje	Změna č.262/19	6	1	4	24

10	Potní pásek	Požadavek normy	Potítko nepokrývá dostatečnou délku vnitřního předního povrchu objímky hlavy.	Selhání normativních požadavků ohledně potního pásu.	10	Nevhodná vysekávací forma použita dodavatelem.	1	Roční kontrola oddělením regulačních záležitostí.	6	60								0
11	Potní pásek	Vnímaná kvalita	Delaminace textilu od pěny potního pásu.	Produkt je vnímán jako nekvalitní	8	Slabá adhezivní vrstva.	4	-	4	128	Sešití vrstev, aby nedošlo k delaminaci (změna ceny)	Odd. Kons. / Odd. Prodeje	Změna č.253/19	8	1	4	32	
12	Potní pásek	Pohodlí a přizpůsobení	Potní pásek dráždí pokožku.	Špatné pohodlí a přijetí uživatelem / nesplněn požadavek normy.	10	Tkanina potního pásu obsahuje chemikálie, která dráždí pokožku nebo je příliš abrazivní.	4	Referenční bezpečnostní list pro látku / hlas zákazníka.	4	160	Zkouška dráždivosti kůže požadovaná pro každý nový použitý materiál zahrnutý v PPAP / nebo použití ověřeného materiálu.	Odd. Kons. / Odd. Prodeje / Odd. Kvality	Změna č. 271/19	10	4	1	40	
13	Skořepina	Požadavek normy	Nadměrná síla G nebo zatížení působící na zkušební maketu hlavy.	Selhání požadavků na tlumení energie dle normy.	10	Materiál skořepiny je po klimatizování příliš tuhý.	1	Jako průvodce návrhem použijte stávající materiály skořepiny, profily tloušťky a umístění bodů připojení dle seznamu specifikací	6	60							0	
14	Skořepina	Požadavek normy	Nadměrná síla G nebo zatížení působící na zkušební maketu hlavy.	Selhání požadavků na tlumení energie dle normy.	10	Připojovací body jsou ve skořápce příliš „vysoko“ a omezují útlumovou kapacitu skořepiny	1	Porovnání požadavků na rozměry na základě 3D CAD modelu.	6	60							0	
15	Skořepina	Požadavek normy	Při penetračních zkouškách dochází k významnému lomu.	Selhání požadavků odolnosti průrazu dle normy.	10	Skořepina je křehká.	4	Kontrola konstrukčního návrhu.	6	240	Použít materiál s lepšími fyzickými vlastnosti.	Odd. Kons. / Odd. Prodeje / Odd. Kvality	Konstrukční požadavek specifikuje použití stávajícího materiálu jako vhodný.	10	1	6	60	
16	Skořepina	Požadavek normy	Při penetračních zkouškách dochází k významnému lomu.	Selhání požadavků odolnosti průrazu dle normy.	10	Mez kluzu materiálu je nedostatečná nebo je příliš závislá na klimatizování / prostředí.	6	-	6	360	Použít materiál s lepšími fyzickými vlastnosti.	Odd. Kons. / Odd. Prodeje / Odd. Kvality	Konstrukční požadavek specifikuje použití stávajícího materiálu jako vhodný.	10	4	4	160	
17	Skořepina	Požadavek normy	Při penetračních zkouškách dochází k významnému lomu.	Selhání požadavků odolnosti průrazu dle normy.	10	Tloušťka skořepiny je tenčí než předepsáno ve výkresu.	6	-	6	360	Porovnání požadavků na rozměry na základě 3D CAD modelu.	Odd. Kons. / Odd. Prodeje / Odd. Kvality	Změna konstrukce - zvýšení tloušťky skořepiny.	10	1	4	40	

Obr. 30)

DFMEA 2. část [46]

## Obr. 31) DFMEA 3. část [46]

18	Skořepina	Vnímaná kvalita	Nedostatečná kvalita hotové skořepiny.	Nedostatečná integrita materiálu.	8	Studený spoj nebo kontaminovaný materiál.	6	Oddělené licí přípojky pro zabezpečení stabilního licího tlaku a teploty.	6	288	Použit parametry dle MDS výrobce materiálu.	Odd. Kons. / Odd. Prodeje / Odd. Kvality	Změna č. 251/19					0
19	Skořepina	Vnímaná kvalita	Nedostatečná kvalita hotové skořepiny.	Poruchy integrity a poruchu skořepiny.	10	Nedostatečné chlazení nebo regulace teploty materiálu.	6	Kontrolní seznam nastavení vstříkolisu.	8	480	Analýza toku a chlazení materiálu vstříkovací sestavy.	Odd. Kons	Změna č. 252/19	4	4	6	96	
20	Skořepina	Vnímaná kvalita	Skořepina nespĺňuje požadavky na hmotnost.	Špatné pohodlí a přijetí uživatelem.	6	Nevhodný materiál.	4	Materiálové požadavky v seznamu specifikací.	6	144	Použijte materiál s nízkou měrnou hmotností / hustotou.	Odd. Kons	Konstrukční požadavek specifikuje použití stávajícího materiálu jako vhodný.	6	1	6	36	
21	Skořepina	Vnímaná kvalita	Skořepina nespĺňuje požadavky na hmotnost.	Špatné pohodlí a přijetí uživatelem.	6	Velký objem skořepiny je nezbytný ke splnění regulačních požadavků.	1	3D návrh optimalizován na pohodlí.	6	36								0
22	Náhlavní opěra	Požadavek normy	Náhlavní vozka se v důsledku nárazu zlomí.	Selhání primární funkce produktu / zranění uživatele.	10	Poddimenzovaná konstrukce.	6	Prototypové zkoušky.	1	60								0
23	Náhlavní opěra	Požadavek normy	Náhlavní vozka se v důsledku nárazu zlomí.	Selhání primární funkce produktu / zranění uživatele.	10	Studený spoj nebo kontaminovaný materiál.	1	Oddělené licí přípojky pro zabezpečení stabilního licího tlaku a teploty.	8	80								0
24	Náhlavní opěra	Retence/držení na hlavě.	Objímka se v důsledku nárazu oddělí od náhlavní vozky.	Ztráta funkce retence/držení na hlavě.	8	Hlava kolíku na objímce proklouzne slotem na náhlavní vozce.	4	Použitý design vyžaduje k uvolnění obou složek rotační pohyb, nikoli tahovou sílu.	1	32								0
25	Náhlavní opěra	Retence/držení na hlavě.	Objímka se v důsledku nárazu oddělí od náhlavní vozky.	Ztráta funkce retence/držení na hlavě.	8	Hlava kolíku na objímce se odlomí.	4	Osvědčený materiál používaný z podobných aplikací.	1	32								0
26	Náhlavní opěra	Pohodlí a přizpůsobení	Rozsah nastavení náhlavní opěry není vhodný pro zamýšlenou skupinu uživatelů.	Špatné pohodlí a přijetí uživatelem.	6	Rozsah nastavení je příliš malý nebo není správně zadán středový bod rozsahu.	4	Antropometrická databáze byla analyzována a použita k vývoji rozsahu nastavení členky.	1	24								0

27	Přilba	Požadavek normy	Nadměrná síla G nebo zatížení působící na zkušební maketu hlavy.	Selhání požadavků na tlumení energie dle normy.	10	Připojovací body jsou příliš blízko u sebe a omezují útlumovou kapacitu skořepiny.	1	3D návrh optimalizován pro správné tlumení.	6	60								0
28	Přilba	Požadavek normy	Vnitřek skořepiny se během nárazu dotkne hlavové formy.	Selhání primární funkce produktu / zranění uživatele.	10	Nízká vnitřní světlá výška.	1	Porovnání požadavků na rozměry na základě 3D CAD modelu.	4	40								0
29	Přilba	Doprava a balení	Přilby se během dopravy deformují.	Produkt je vnímán jako nekvalitní	6	Nadměrné přepravní parametry vysoké teploty a stárnutí.	4	-	4	96								0
30	Přilba	Požadavek normy	Při nárazu náhlavní vložka se rozlomí.	Nedostatečná ochrana při nárazu / zranění uživatele	10	Vysoké zbytkové napětí v materiálu náhlavní vložky.	1	Simulace vstřikování.	6	60								0
37	Přilba	Ergonomie	Omezené zorné pole.	Nízká akceptace ze strany uživatelů / uživatel narazí na horní překážku.	8	Příliš dlouhý kšilt.	4	Hlas zákazníka a validační testy.	1	32								0
32	Přilba	Značení	Štítek nedrží.	Štítek se odlepí během přepravy / používání.	6	Nedostatečná adheze / tvar štítku.	6	Výkres štítku a specifikace dle seznamu specifikací.	1	36								0
33	Zabalený produkt	Značení	Nesprávné nebo chybějící značení na produktu.	Nesplnění normativních požadavků.	10	Chybějící validace produktu.	6	-	4	240	Kvalita a odd. regul. zál. Je potřebný pro schválení produktu z hlediska regulačních požadavků.	Odd. kvality / odd. regulačních zál.	Změna č. 261/19	10	1	4	40	

Obr. 32)

DFMEA 4. část [46]

Obr. 33) PFMEA 1. část [46]

PFMEA - Přílba																	
Název produktu:		Průmyslová ochranná přílba	Číslo produktu:	P100	Vypracováno (tým FMECA)	QE, PRE, PE, QT	Quality Engineer Process engineer Product Expert Quality Technician										
FMECA moderátor:		QE	Produktový expert	PE	Datum platnosti:	05/22/2019	Revize:	Rev A									
Číslo vstupu	Bod	Funkční požadavek produktu	Režim potenciálního selhání	Potenciální následek	ISEV	Příčina	IOCC	Aktuální kontrola	IDET	IRPN	Doporučené akce	Zodpovědné oddělení	Přijatá opatření	pSEV	pOCC	pDET	pRPN
1	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 4	Přílba v souladu s EN 397, kapitola 4.1 týkající se materiálů a konstrukce	Chybějící zpráva o testování.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	10	Certifikační testování neprobíhá v certifikované externí laboratoři.	1	Plán kvality přílby obsahuje tento kontrolní bod a konstrukce a design jsou ověřeny.	6	60							0
2	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 4	Přílba v souladu s EN 397, kapitola 4.1 týkající se materiálů a konstrukce	Výrobek nesplňuje normu EN 397, kapitola 4.1 týkající se materiálů a konstrukce.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	10	Požadavek na testování není zohledněn v případě změny designu pro kontrolní plán.	4	-	8	320	Přidání bodu do kontrolního plánu.	Odd. kvality	Přidán kontrolní bod do plánu CP & CCT.	10	6	1	60
3	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 4	Přílba v souladu s normou EN 397, kapitola 4.2, týkající se vnější vertikální vzdálenosti	Chybějící roční zpráva o testování.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	8	Roční testování neprobíhá v certifikované externí laboratoři.	4	Plán kvality přílby obsahuje tento kontrolní bod a konstrukce a design jsou ověřeny.	1	32							0
4	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 4	Přílba v souladu s normou EN 397, kapitola 4.2, týkající se vnější vertikální vzdálenosti	Výrobek nesplňuje normu EN 397, kapitola 4.2 týkající se vnější svislé vzdálenosti	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	8	Požadavek na testování není zohledněn v případě změny designu pro kontrolní plán.	4	-	8	256	Přidání bodu do kontrolního plánu.	Odd. kvality	Přidán kontrolní bod do plánu CP & CCT.	8	4	1	32
5	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 4	Přílba v souladu s normou EN 397, kapitola 4.3 týkající se vnitřní svislé vzdálenosti	Chybějící roční zpráva o testování.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	8	Roční testování neprobíhá v certifikované externí laboratoři.	4	Plán kvality přílby obsahuje tento kontrolní bod a konstrukce a design jsou ověřeny.	1	32							0
6	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 4	Přílba v souladu s normou EN 397, kapitola 4.3 týkající se vnitřní svislé vzdálenosti	Výrobek nesplňuje normu EN 397, kapitola 4.3 týkající se vnitřní svislé vzdálenosti	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	8	Požadavek na testování není zohledněn v případě změny designu pro kontrolní plán.	4	-	8	256	Přidání bodu do kontrolního plánu.	Odd. kvality	Přidán kontrolní bod do plánu CP & CCT.	8	4	1	32



7	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 4	Přilba v souladu s EN 397 kapitola 4.4 týkající se vnitřní světlé výšky	Chybějící roční zpráva o testování.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	8	Roční testování neprobíhá v certifikované externí laboratoři.	4	Plán kvality přilby obsahuje tento kontrolní bod a konstrukce a design jsou ověřeny.	1	32							0
8	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 4	Přilba v souladu s EN 397 kapitola 4.4 týkající se vnitřní světlé výšky	Výrobek nesplňuje normu EN 397, kapitola 4.4 týkající se vnitřní světlé výšky.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	8	Požadavek na testování není zohledněn v případě změny designu pro kontrolní plán.	4	-	8	256	Přidání bodu do kontrolního plánu.	Odd. kvality	Přidán kontrolní bod do plánu CP & CCT.	8	4	1	32
9	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 4	Přilba v souladu s normou EN 397, kapitola 4.5 týkající se vodorovné vzdálenosti	Chybějící roční zpráva o testování.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	8	Roční testování neprobíhá v certifikované externí laboratoři.	4	Plán kvality přilby obsahuje tento kontrolní bod a konstrukce a design jsou ověřeny.	1	32							0
10	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 4	Přilba v souladu s normou EN 397, kapitola 4.5 týkající se vodorovné vzdálenosti	Výrobek nesplňuje normu EN 397, kapitola 4.5 týkající se vodorovné vzdálenosti	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	8	Požadavek na testování není zohledněn v případě změny designu pro kontrolní plán.	4	-	8	256	Přidání bodu do kontrolního plánu.	Odd. kvality	Přidán kontrolní bod do plánu CP & CCT.	8	4	1	32
11	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 4	Přilba v souladu s normou EN 397, kapitola 4.6, týkající se výšky nošení	Chybějící roční zpráva o testování.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	8	Roční testování neprobíhá v certifikované externí laboratoři.	4	Plán kvality přilby obsahuje tento kontrolní bod a konstrukce a design jsou ověřeny.	1	32							0
12	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 4	Přilba v souladu s normou EN 397, kapitola 4.6, týkající se výšky nošení	Product not fulfilling EN 397 chapter 4.6 regarding Wearing height	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	8	Požadavek na testování není zohledněn v případě změny designu pro kontrolní plán.	4	-	8	256	Přidání bodu do kontrolního plánu.	Odd. kvality	Přidán kontrolní bod do plánu CP & CCT.	8	4	1	32
13	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 5	Přilba v souladu s EN 397, kapitola 5.1.1, týkající se tlumení nárazů.	Chybějící roční zpráva o testování.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	8	Roční testování neprobíhá v certifikované externí laboratoři.	6	Plán kvality přilby obsahuje tento kontrolní bod s nesprávným odkazem na standard / kapitolu.	4	192	Přidání správného standardu a jeho kapitoly do kontrolního plánu.	Odd. kvality	Přidán kontrolní bod do plánu CP & CCT.	8	6	1	48
14	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 5	Přilba v souladu s EN 397, kapitola 5.1.1, týkající se tlumení nárazů.	Výrobek nesplňuje normu EN 397, kapitola 5.1.1 týkající se tlumení nárazů.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	8	Požadavek na testování není zohledněn v případě změny designu pro kontrolní plán.	4	-	8	256	Přidání bodu do kontrolního plánu.	Odd. kvality	Přidán kontrolní bod do plánu CP & CCT.	8	4	1	32

15	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 5	Přílba v souladu s EN 397, kapitola 5.1.2, týkající se odolnosti proti průniku.	Chybějící roční zpráva o testování.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	8	Roční testování neprobíhá v certifikované externí laboratoři.	6	Plán kvality přílby obsahuje tento kontrolní bod s nesprávným odkazem na standard / kapitolu.	4	192	Přidání správného standardu a jeho kapitoly do kontrolního plánu.	Odd. kvality	Přidán kontrolní bod do plánu CP & CCT.	8	6	1	48
16	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 5	Přílba v souladu s EN 397, kapitola 5.1.2, týkající se odolnosti proti průniku.	Výrobek nesplňuje EN 397, kapitola 5.1.2, týkající se odolnosti proti průniku.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	8	Požadavek na testování není zohledněn v případě změny designu pro kontrolní plán.	4	-	8	256	Přidání bodu do kontrolního plánu.	Odd. kvality	Přidán kontrolní bod do plánu CP & CCT.	8	4	1	32
17	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 5	Přílba v souladu s EN 397, kapitola 5.1.3, týkající se odolnosti proti plameni.	Chybějící roční zpráva o testování.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	8	Roční testování neprobíhá v certifikované externí laboratoři.	6	Plán kvality přílby obsahuje tento kontrolní bod s nesprávným odkazem na standard / kapitolu.	4	192	Přidání správného standardu a jeho kapitoly do kontrolního plánu.	Odd. kvality	Přidán kontrolní bod do plánu CP & CCT.	8	6	1	48
18	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 5	Přílba v souladu s EN 397, kapitola 5.1.3, týkající se odolnosti proti plameni.	Výrobek nesplňuje normu EN 397, kapitola 5.1.3 týkající se odolnosti proti plameni.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	8	Požadavek na testování není zohledněn v případě změny designu pro kontrolní plán.	4	-	8	256	Přidání bodu do kontrolního plánu.	Odd. kvality	Přidán kontrolní bod do plánu CP & CCT.	8	4	1	32
19	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 5	Přílba v souladu s EN 397 kapitola 5.1.4 týkající se odolnosti upevnění podbradního pásku.	Chybějící roční zpráva o testování.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	8	Roční testování neprobíhá v certifikované externí laboratoři.	6	Plán kvality přílby obsahuje tento kontrolní bod s nesprávným odkazem na standard / kapitolu.	4	192	Přidání správného standardu a jeho kapitoly do kontrolního plánu.	Odd. kvality	Přidán kontrolní bod do plánu CP & CCT.	8	6	1	48
20	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 5	Přílba v souladu s EN 397 kapitola 5.1.4 týkající se odolnosti upevnění podbradního pásku.	Výrobek nesplňuje normu EN 397, kapitolu 5.1.4, týkající se odolnosti upevnění podbradního pásku.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	8	Požadavek na testování není zohledněn v případě změny designu pro kontrolní plán.	4	-	8	256	Přidání bodu do kontrolního plánu.	Odd. kvality	Přidán kontrolní bod do plánu CP & CCT.	8	4	1	32
21	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 5	Přílba v souladu s EN 397, kapitola 5.2.3, týkající se elektrických vlastností.	Chybějící roční zpráva o testování.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	8	Roční testování neprobíhá v certifikované externí laboratoři.	6	Plán kvality přílby obsahuje tento kontrolní bod s nesprávným odkazem na standard / kapitolu.	4	192	Přidání správného standardu a jeho kapitoly do kontrolního plánu.	Odd. kvality	Added correct point to CP&CCT Plan.	8	6	1	48

22	Testování - Fyzikální požadavky podle EN 397, 5	Přílba v souladu s EN 397, kapitola 5.2.3, týkající se elektrických vlastností.	Výrobek nesplňuje EN 397 kapitolu 5.2.3 týkající se elektrických vlastností.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	8	Požadavek na testování není zohledněn v případě změny designu pro kontrolní plán.	4	-	8	256	Přidání bodu do kontrolního plánu.	Odd. kvality	Added control point to CP&CCT Plan.	8	4	1	32
23	Požadavky na značení podle EN 397, 7	Přílba v souladu s EN 397, kapitola 7.1 týkající se požadavků na značení.	Produkt nesplňuje normu EN 397, kapitola 7.1 týkající se požadavků na značení - nesprávné / neplatné / chybějící informace o produktu.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	6	Požadavek na testování není zohledněn v případě změny designu pro starší kontrolní plán.	6	-	4	144	Přidání bodu do kontrolního plánu.	Odd. kvality	Přidán kontrolní bod do plánu CP & CCT.	6	6	1	36
24	Požadavky na značení podle EN 397, 7	Přílba v souladu s EN 397, kapitola 7.1 týkající se požadavků na značení.	Produkt nesplňuje normu EN 397, kapitola 7.1 týkající se požadavků na značení - nesprávné / neplatné / chybějící informace o produktu.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	6	Požadavek inspekce není uvedena v postupu/instrukce finální kontroly výrobku.	4	-	6	144	Specifikovat požadavek a zavést do postupu/instrukce finální kontroly výrobku.	Odd. kvality	Změna č 263/19	6	4	1	24
25	Požadavky na značení podle EN 397, 7	Přílba v souladu s normou EN 397, kapitola 7.2 týkající se požadavků na značení.	Produkt nesplňuje normu EN 397, kapitola 7.2 týkající se požadavků na značení - nesprávné / neplatné / chybějící informace o produktu.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	6	Požadavek na testování není zohledněn v případě změny designu pro starší kontrolní plán.	6	-	4	144	Přidání bodu do kontrolního plánu.	Odd. kvality	Přidán kontrolní bod do plánu CP & CCT.	6	6	1	36
26	Požadavky na značení podle EN 397, 7	Přílba v souladu s normou EN 397, kapitola 7.2 týkající se požadavků na značení.	Produkt nesplňuje normu EN 397, kapitola 7.2 týkající se požadavků na značení - nesprávné / neplatné / chybějící informace o produktu.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	6	Požadavek inspekce není uvedena v postupu/instrukce finální kontroly výrobku.	4	-	6	144	Specifikovat požadavek a zavést do postupu/instrukce finální kontroly výrobku.	Odd. kvality	Změna č 264/19	6	4	1	24
27	Značení CE a EAC	Čepice obsahuje platné a správné označení CE a EAC	Product not containing marking for CE/EAC according to drawing.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	6	Požadavek na testování není zohledněn v případě změny designu pro starší kontrolní plán.	6	-	4	144	Přidání bodu do kontrolního plánu.	Odd. kvality	Přidán kontrolní bod do plánu CP & CCT.	6	6	1	36
28	Značení CE a EAC	Čepice obsahuje platné a správné označení CE a EAC	Výrobek neobsahuje označení pro CE / EAC podle výkresu.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	6	Požadavek inspekce není uvedena v postupu/instrukce finální kontroly výrobku.	4	-	6	144	Specifikovat požadavek a zavést do postupu/instrukce finální kontroly výrobku.	Odd. kvality	Změna č 265/19	6	4	1	24

Obr. 36)

PFMEA 4. část [46]

29	Značení CE a EAC	Čepice obsahuje platné a správné označení CE a EAC	Výrobek neobsahuje označení pro CE / EAC podle výkresu.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	6	Požadavek na testování není zohledněn v případě změny designu pro starší kontrolní plán.	6	-	4	144	Přidání bodu do kontrolního plánu.	Odd. kvality	Přidán kontrolní bod do plánu CP & CCT.	6	6	1	36
30	Značení CE a EAC	Čepice obsahuje platné a správné označení CE a EAC	Výrobek neobsahuje označení pro CE / EAC podle výkresu.	Regulační / právní požadavky nejsou splněny.	6	Požadavek inspekce není uvedena v postupu/instrukce finální kontroly výrobku.	4	-	6	144	Specifikovat požadavek a zavést do postupu/instrukce finální kontroly výrobku.	Odd. kvality	Změna č 266/19	6	4	1	24
31	Finální inspekce	Produkt splňující všechny právní, regulační, fyzické, výkonové, označovací a balící požadavky.	Produkt neodpovídá stanovené úrovni kvality.	Regulační / právní / fyzické / výkonové / označovací / balící požadavky nejsou splněny.	8	Požadavek inspekce není uvedena v postupu/instrukce finální kontroly výrobku.	6	-	4	192	Specifikovat požadavek a zavést do postupu/instrukce finální kontroly výrobku.	Odd. kvality	Změna č 267/19	8	4	1	32
32	Vstřikování - skořepina	Skořepina úplná dle požadavků produktové specifikace - žádné vizuální a fyzické vady.	Nedolití, přetok, propadliny, tokové čáry, stopy po studené spoji, stopy po vyhazovačích, ořepky viditelné na skořepině.	Produkt nesplňující požadavky = zmetek.	8	Nesprávný materiál v lisu.	6	Materiál určen v kontrolním seznamu nastavení.	4	192	Specifikovat požadavek a zavést do postupu/instrukce finální kontroly výrobku.	Odd. kvality	Změna č 268/19	8	6	1	48
33	Vstřikování - skořepina	Skořepina úplná dle požadavků produktové specifikace - žádné vizuální a fyzické vady.	Nedolití, přetok, propadliny, tokové čáry, stopy po studené spoji, stopy po vyhazovačích, ořepky viditelné na skořepině.	Produkt nesplňující požadavky = zmetek.	8	Nesprávný teplota sušení.	6	Teplota sušení nastavena na sušičce a parametry dle kontrolního seznamu nastavení.	4	192	Specifikovat požadavek a zavést do postupu/instrukce finální kontroly výrobku.	Odd. kvality	Změna č 269/19	8	6	1	48
34	Vstřikování - skořepina	Skořepina úplná dle požadavků produktové specifikace - žádné vizuální a fyzické vady.	Nedolití, přetok, propadliny, tokové čáry, stopy po studené spoji, stopy po vyhazovačích, ořepky viditelné na skořepině.	Produkt nesplňující požadavky = zmetek.	8	Nesprávné parametry vstřikování.	6	Parametry dle kontrolního seznamu nastavení.	6	288	Specifikovat požadavek a zavést do postupu/instrukce finální kontroly výrobku.	Odd. kvality	Změna č 270/19	8	6	1	48
35	Vstřikování - skořepina	Skořepina úplná dle požadavků produktové specifikace - žádné vizuální a fyzické vady.	Nedolití, přetok, propadliny, tokové čáry, stopy po studené spoji, stopy po vyhazovačích, ořepky viditelné na skořepině.	Produkt nesplňující požadavky = zmetek.	8	Chybějící plán údržby formy.	8	-	8	512	Definovat plán údržby na formu.	Odd. údržby / Odd. kvality	Změna č 272/19	8	4	4	128

## 10.7 Zhodnocení procesu a přínosů metod po nápravních opatření

Největší negativní vliv na proces výroby má chybějící kontrola, nedostatečná úroveň přizpůsobení vstupů a procesních parametrů společně s nedbalostí personálu.

V případě procesu výroby a testování průmyslových ochranných přileb se poukázalo, že kombinace těchto faktorů může vést k značným ztrátám ve společnosti. V analýze spolehlivosti procesu se posvítilo na body, které způsobují největší ztráty v procesu. Těmto poruchám se mohlo předejít v případě včasné identifikace poruchových stavů, nebo v případě rozeznání některých náznaků, jako například vady chladicího okruhu, únik tlaku přes dýzu, atd.

Pomocí identifikace těchto problémů a nadefinování vhodných akcí a nápravních opatření, společně s vytvořením jejich podkladů v podobě DFMEA a PFMEA se mohlo začít postupné opravy formy a chladicího systému. Procentuální zlepšení pozorovatelné skrz RPN po aplikaci nápravních opatření pro DFMEA představovalo 86,83% a pro PFMEA 82,33%, což představuje značné zlepšení.

Od té doby dle sledovaných dat a pomocí záznamů vyvolaných pomocí rozšíření kontrolního plánu se RTY a DPMO přibližují žádaných hodnot a cílů. RTY je současně na úrovni kolem 96-98%, což představuje patrný růst a DPMO je v průměru na hodnotách kolem 250 až 400 ppm, který naznačuje zlepšení v tomto směru.

Pomocí této analýzy a doporučení se docílilo, že proběhl rozsáhlý projekt cílem adresovat chybějící plány údržby pro vstřikovací formy a to pomocí také externí kontroly mimo oddělení údržby pomocí vyžadování těchto záznamů v kontrolním plánu, jak je to znázorněno i pro kontrolní plán přilby na obrázku 38.

Kontrolní plán - Přilba												
Název produktu :	Průmyslová ochranná přilba	Číslo produktu:	P100	Vypracováno	QE, QT, PE	Quality Engineer Process engineer Quality Technician						
KP zodp.:	QE	Produktový expert	PE	Datum platnosti:	05/22/2019	Revize:	Rev A					
Č. operace / procesu	Ref. operace / procesu	Nástroje	Č. char.	Definice charakteristiky	Specifikace	Metoda kontroly	Množství	Frekvence	Metoda vyhodnocení	Plán v případě neshody	Zodp.	Lokace kontroly
P100-M	Vstřikování		1	Požadavky vstřikování	Kontrola správného materiálu dle zakázky.	Ověření + Vizualní	100%	Na začátku zakázky / po údržbě / po čištění.	Pracovní postup vstřikování.	1. Zastavení výroby 2. Umístění materiálu do oblasti karantény. 3. Oznámení man. Kvality.	Vedoucí výroby	Vstřikování
			2		Kontrola sušičky a parametrů sušení dle kontrolního seznamu pro materiál.	Ověření + Vizualní	100%	Na začátku zakázky a každé 2 hodiny.	Kontrolní seznam sušičky.	1. Zastavení výroby 2. Umístění materiálu do oblasti karantény. 3. Oznámení man. Kvality.	Vedoucí výroby	Vstřikování
			3		Kontrola vstřikovacích parametrů dle kontrolního seznamu.	Ověření + Vizualní	100%	Na začátku zakázky a každou hodinu.	Kontrolní seznam vstřikování.	1. Zastavení výroby 2. Umístění materiálu do oblasti karantény. 3. Oznámení man. Kvality.	Vedoucí výroby	Vstřikování
			4		Měření povrchové teploty formy dle kontrolního seznamu.	Měření	3	Začátek, uprostřed a konec každé zakázky.	Kontrolní seznam vstřikování a zápisný formulář V-001.	1. Zastavení výroby 2. Umístění materiálu do oblasti karantény. 3. Oznámení man. Kvality.	Vedoucí výroby	Vstřikování
			5		Kontrola plánu údržby a seznamu provedených úkolů.	Ověření + Vizualní	1	Každý týden.	Pracovní postup procesní kontroli vstřikování.	1. Zastavení výroby 2. Umístění materiálu do oblasti karantény. 3. Oznámení man. Kvality.	Manažér kvality	Vstřikování

Obr. 38) Část kontrolního plánu pro přilbu [46]



## 11 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byla analýza spolehlivosti průmyslových ochranných přileb s cílem vyhodnotit možné výsledky společnosti pomocí určitých ukazatelů spolehlivosti.

V teoretické části této práce jsem uvedl základní postoj spolehlivosti obecně v rámci kvality, kde jsem poukázal na historický vývoj, naznačil spolehlivost v užším a širším pojetí a její rozdělení z hlediska životního cyklu objektů. V další části jsem vyzdvihнул matematické předpoklady potřebné k řešení spolehlivosti, zejména z hlediska pravděpodobnosti rozdělení diskrétních a spojitých náhodných proměnných a poukázal jsem na nejvíce používané charakteristiky pro popis náhodných proměnných z matematického hlediska s určitým doporučením pro vhodnost použití v technické praxi. V teoretické části jsem pak dále uvedl nejvhodnější ukazatele spolehlivosti, které ovšem ne vždycky najdou uplatnění v reálním provozu. Proto jsem uvedl v další části i ukazatele spolehlivosti nejfrekventovaněji používané v technickém odvětví výroby, které mají za cíl vyčíslení ztrát a vad a tím poukázání na aktuální úroveň dospělosti procesů. V neposlední řadě jsem pak rozvinul podstatu analýzy spolehlivosti, pro kterou jako doplněk jsem uvedl princip stanovení nákladovosti životních cyklů pro určení důležitých souvislostí, a finálně vyjmenoval jednotlivé body obecného postupu pro iniciaci analýzy spolehlivosti, pro kterou jsem rozvinul dvojce významné metody, princip a základní postup analýzy stromu poruchových stavů FTA, a také analýzu způsobů a důsledků poruch FMEA. V poslední části jsem popsal metodu Six Sigma, její princip a některé nástroje, zejména Pareto analýzu a plánování experimentů DOE.

V praktické části diplomové práce jsem popsal základní postavení společnosti PLS s.r.o. a určité legislativní a normativní požadavky pro výrobu, testování, zabezpečování kvality a uvádění na trh Evropské Unie. Následně jsem popsal současný stav procesu a pomocí sběru dat jsem ukázal na výkonnostní parametry procesu a spolehlivosti výroby. Pomocí nástrojů jako analýza Pareto, DOE a FMEA jsem posvítil na chybějící požadavky, kontroly a okolnosti, které byli neprospívající pro společnost a ukazatele. Na konec jsem uvedl nápravní opatření a zhodnocení změn v procesu výroby průmyslových ochranných přileb.





## 12 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MYKISKA, Antonín. *Bezpečnost a spolehlivost technických systémů*. Vyd. 2. přeprac. V Praze: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02868-2.
- [2] HAMMER, Milos. *SPOLEHLIVOST 1: Přednášky pro kombinované studium* [studijní materiál]. Brno, 2016.
- [3] HOLUB, Rudolf, VINTR, Zdeněk. Spolehlivost letadlové techniky (elektronická učebnice) [online]. Brno, 2001 [cit. 2020-02-11]. Dostupné z: <https://adoc.pub/spolehlivost-letadlove-techniky.html>
- [4] KUMAR, Saurabh. RELIABILITY ANALYSIS AND COST MODELING OF DEGRADING SYSTEMS. Luleå, Švédsko, 2008. Disertace. Luleå University of Technology.
- [5] HISTORY OF RELIABILITY ENGINEERING: History of Reliability by James McLinn [online]. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <https://www.asqrd.org/home/history-of-reliability/>
- [6] Bez spolehlivosti není jakosti: materiály z 33. setkání odborné skupiny pro spolehlivost: Praha, listopad 2008 : [sborník přednášek. Praha: Česká společnost pro jakost, 2008. ISBN ISBN978-80-02-02104-9.
- [7] FUCHS, Pavel, David VALIŠ, Josef CHUDOBA, Jan KAMENICKÝ a Jaroslav ZAJÍČEK. Řízení jakosti a spolehlivosti: ŘÍZENÍ SPOLEHLIVOSTI - XI. [studijní materiál]. Liberec.
- [8] FAMFULÍK, Jan. Teorie údržby. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1029-8.
- [9] BEDÁŇOVÁ, Iveta. Bezpečnost a kvalita potravin Zdravotní nezávadnost a kvalita potravin v gastronomii: BIostatistika [multimediální výukový text pro studenty]. Brno [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://cit.vfu.cz/statpotr/>
- [10] JANKOVÝCH, Róbert. Statistické řízení procesů: 8. Statistická regulace srovnáváním. [studijní materiál]. Brno.
- [11] BRIŠ, Radim a Martina LITSCHMANNOVÁ. STATISTIKA I. pro kombinované a distanční studium: 5 DISKRÉTNÍ ROZDĚLENÍ PRAVDĚPODOBNOСТИ [online]. Ostrava [cit. 2020-08-11]. Dostupné z: [https://homel.vsb.cz/~dom033/predmety/statistika/ucebni\\_text/7DENV.pdf](https://homel.vsb.cz/~dom033/predmety/statistika/ucebni_text/7DENV.pdf)
- [12] JANKOVÝCH, Róbert. Statistické řízení procesů: 7. Statistická regulace měřením. [studijní materiál]. Brno.
- [13] BRIŠ, Radim a Martina LITSCHMANNOVÁ. STATISTIKA I. pro kombinované a distanční studium: 6 SPOJITÁ ROZDĚLENÍ PRAVDĚPODOBNOСТИ [online]. Ostrava [cit. 2020-08-11]. Dostupné z: [https://homel.vsb.cz/~dom033/predmety/statistika/ucebni\\_text/8SNV.pdf](https://homel.vsb.cz/~dom033/predmety/statistika/ucebni_text/8SNV.pdf)
- [14] NOVOTNÝ, Radovan. Weibullovo rozdělení při analýzách bezporuchovosti [online]. 2002, 04.03.2002, (17), 12 [cit. 2020-09-07]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02017/index.html>
- [15] BRLICA, P. Management spolehlivosti. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Hana Opočenská.

- [16] VÍTEČKOVÁ, Miluše, Petr PŘIDAL a Tomáš KOUDELA. Základy teorie pravděpodobnosti a teorie grafů [online]. Ostrava, 2006 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/SystAnal/texty/download/cele.pdf>
- [17] ČSN EN 61703 ED. 2 (010607). Matematické výrazy pro ukazatele bezporuchovosti, pohotovosti, udržovatelnosti a zajištěnosti údržby. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ), 2017.
- [18] ČSN IEC 60050-192. Mezinárodní elektrotechnický slovník – Část 192: Spolehlivost + A1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ), 2018.
- [19] ČSN IEC 60050-692. Mezinárodní elektrotechnický slovník - Část 692: Výroba, přenos a rozvod elektrické energie - Spolehlivost a kvalita služby elektrizačních soustav. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ), 2019.
- [20] GEHLOFF, Mike. OEE vs. MTBF: Která z nich je ta pravá metoda měření? ŘÍZENÍ A ÚDRŽBA PRŮMYSLOVÉHO PODNIKU [online]. 2016, 2016, 2016(48), 3 [cit. 2020-06-07]. Dostupné z: [http://udrbapodniku.cz/index.php?id=47&no\\_cache=1&tx\\_ttnews\[tt\\_news\]=6743&Hash=a1f222ba99&type=98](http://udrbapodniku.cz/index.php?id=47&no_cache=1&tx_ttnews[tt_news]=6743&Hash=a1f222ba99&type=98)
- [21] Process Performance Metrics. Sixsigmastudyguide.com [online]. [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://sixsigmastudyguide.com/process-performance-metrics/>
- [22] FEHÉR, Norbert. A LEAN SIX SIGMA: Folyamatfejlesztés kézikönyve. Zalaegerszeg, 2014. Dostupné také z: <https://leansixsigmakezikonyv.hu/ismerteto/>
- [23] FPY (First Pass Yield). In: ManagementMania.com [online]. Wilmington (DE) 2011-2020, 20.02.2017 [cit. 29.07.2020]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/fpy-first-pass-yield>
- [24] PREDIKTIVNÍ ANALÝZY SPOLEHLIVOSTI A MOŽNOSTI JEJICH VYUŽITÍ: Materiály z 60. semináře odborné skupiny pro spolehlivost. Brno: Česká společnost pro jakost, 2015. ISBN 978-80-7231-965-7.
- [25] ČSN EN 61025. Analýza stromu poruchových stavů (FTA). Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [26] Feng Zhang, Shiwang Tan, Leilei Zhang, Yameng Wang, Yang Gao, "Fault Tree Interval Analysis of Complex Systems Based on Universal Grey Operation", Complexity, vol. 2019, Article ID 1046054, 8 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/1046054>
- [27] ČSN EN IEC 60812 ED. 2. Analýza způsobů a důsledků poruch (FMEA a FMECA). Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ), 2019.
- [28] KŘÍDLOVÁ, Gabriela. VYUŽITÍ METODY FMEA V PROCESU NÁKUPU V SEGMENTU AUTOMOTIVE. Mladá Boleslav, 2015. Diplomová práce. ŠKODA AUTO VYSOKÁ ŠKOLA, O.P.S.
- [29] EICHLER, Tomáš. Nebojte se FMEA [online]. 2016, 10.06.2016, , 6 [cit. 2020-08-15]. Dostupné z: <http://kvalita-jednoduse.cz/fmea/>
- [30] Analýza možných způsobů a důsledků poruch (FMEA): referenční příručka. 4. vyd. Praha: Česká společnost pro jakost, 2008. ISBN 978-80-02-02101-8.

- [31] MACHAN, Jaroslav. Metody kvality užívané ve fázi vývoje výrobku - aplikace v automobilovém průmyslu. 2., přeprac. a rozš. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, Fakulta dopravní, 2012. ISBN 978-80-87042-50-2.
- [32] KOŠÍKOVÁ, Jana. ZÁKLADNÍ MYŠLENKY METODY SIX SIGMA. Brno, 2008. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Josef Bednář, Ph.D.
- [33] ČSN ISO 13053-2. Kvantitativní metody zlepšování procesu – Six Sigma: Část 2: Nástroje a postupy. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ), 2014.
- [34] PANDE, Peter S., Robert P. NEUMAN a Roland R. CAVANAGH. Zavádíme metodu Six Sigma, aneb, Jakým způsobem dosahují renomované světové společnosti špičkové výkonnosti. Brno: TwinsCom, c2002. ISBN 80-238-9289-4.
- [35] Six Sigma. Lean Six Sigma [online]. Praha, 2018 [cit. 2020-08-25]. Dostupné z: <https://lean6sigma.cz/six-sigma/>
- [36] Lean Six Sigma Methodology Basics and Quality Improvement in the Clinical Chemistry Laboratory [online]. 2007 [cit. 2020-08-28]. Dostupné z: Obr. 20) <https://basicmedicalkey.com/lean-six-sigma-methodology-basics-and-quality-improvement-in-the-clinical-chemistry-laboratory/>
- [37] ČSN ISO 13053-1. Kvantitativní metody zlepšování procesu – Six Sigma: Část 1: Metodologie DMAIC. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ), 2013.
- [38] WHAT IS SIX SIGMA? [online]. American Society for Quality [cit. 2020-08-28]. Dostupné z: <https://asq.org/quality-resources/six-sigma>
- [39] PARETO ANALÝZA [online]. Brno, 2012 [cit. 2020-09-07]. Dostupné z: <https://www.vlastnicesta.cz/metody/pareto-analyza/>
- [40] Paretova analýza. Statsoft [online]. Praha, 2013, 07.05.2013 [cit. 2020-09-07]. Dostupné z: [http://www.statsoft.cz/file1/PDF/newsletter/2013\\_05\\_07\\_StatSoft\\_Paretuv\\_graf.pdf](http://www.statsoft.cz/file1/PDF/newsletter/2013_05_07_StatSoft_Paretuv_graf.pdf)
- [41] BOWER, Keith M. WHAT IS DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE)? ASQ Excellence Through Quality [online]. American Society for Quality [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: <https://asq.org/quality-resources/design-of-experiments>
- [42] DOE (Design of Experiments). Management Mania [online]. Plzeň, 2015, 24.07.2015 [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/design-of-experiments>
- [43] Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2016/425 ze dne 9. března 2016 o osobních ochranných prostředcích a o zrušení směrnice Rady 89/686/EHS. In: . Úřední věstník Evropské unie. L 81/51, 2016. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/HTML/?uri=CELEX:32016R0425&from=CS>
- [44] ČSN EN 397+A1. Průmyslové ochranné přilby. Vyd. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ), 2013.
- [45] Osobní ochranné prostředky - Pícha Safety, s.r.o. [online]. Praha [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: <https://www.oopp.cz/ochranné-pracovní-pomucky-praha-pg44.html>
- [46] Firemní podklady, PLS s.r.o., 2019



# 13 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

## 13.1 Seznam tabulek

Tab 1)	Vybrané metody analýzy spolehlivosti a vhodnost jejich použití [1] .....	55
Tab 2)	Symboly používané pro sestavu stromu poruchových stavů [1,24] .....	57
Tab 3)	Rozpis faktorů a úrovní [41].....	73
Tab 4)	Návrh 4 běhů dvoufaktorového experimentu [41] .....	73
Tab 5)	Rozpis pro určení účinek interakcí na výsledek experimentu [41] .....	74
Tab 6)	Přehled jednotlivých částí přilby [46] .....	84
Tab 7)	Přehled ukazatelů výkonnosti [46] .....	84
Tab 8)	Faktory a úrovně pro DOE [46].....	88
Tab 9)	DOE s výsledky zkoumání [46].....	88
Tab 10)	Tabulka hodnotících kritérií pro FMEA [46] .....	90

## 13.2 Seznam obrázků

Obr. 1)	Určení jakosti pomocí užitečných vlastností [1,2].....	17
Obr. 2)	Spolehlivost v užším a širším pojetí [1] .....	20
Obr. 3)	Spolehlivost v etapách životního cyklu [1,2] .....	23
Obr. 4)	Weibullovo rozdělení aproximující vanovou křivku [15] .....	31
Obr. 5)	Závislost Weibullovo rozdělení na parametru tvaru $\beta$ při $\eta=1$ [13] .....	32
Obr. 6)	Hustota pravděpodobnosti pro obecné normální rozdělení [16].....	33
Obr. 7)	Distribuční funkce pro normální rozdělení [16].....	33
Obr. 8)	Distribuční funkce v grafické podobě [9].....	35
Obr. 9)	Graf znázorňující pustotu pravděpodobnosti náhodné veličiny [3].....	36
Obr. 10)	Pravděpodobnostní funkce pro diskrétní náhodnou proměnnou [3] .....	37
Obr. 11)	Rozdíl mezi MTBF(MOTBF) a METBF [17].....	42
Obr. 12)	Rozlišení reziduálních a systematických slabostí poruch [2].....	50
Obr. 13)	Hlavní skupiny nákladových složek [2] .....	52
Obr. 14)	Systémový přístup v případě řešení problematiky spolehlivosti [1] .....	52
Obr. 15)	Postup analýzy spolehlivosti podle ČSN IEC 60300-3-1 [1].....	53
Obr. 16)	Příklad stromu poruchových stavů [26].....	56
Obr. 17)	Návaznost druhů FMEA [28] .....	59
Obr. 18)	Návaznost dokumentace PFMEA [29] .....	60
Obr. 19)	Základní postup analýzy FMEA [24] .....	61
Obr. 20)	Rozdíl mezi $3\sigma$ a $6\sigma$ procesem [22].....	68
Obr. 21)	Úrovně znalostí a postup neustálého zlepšování [37] .....	70
Obr. 22)	Paretův diagram [40] .....	71
Obr. 23)	Ilustrační znázornění možného produktového portfolia OOPP [45] .....	82
Obr. 24)	Mapa procesu výroby a testování přileb [46] .....	83
Obr. 25)	Klesající trend RTY Říjen18-Březen19 [46].....	85
Obr. 26)	Počáteční stav DPMO a $\sigma$ procesu výroby a testování přileb [46].....	85

Obr. 27)	Paretův graf pro poruchy vstřikování skořepiny [46] .....	86
Obr. 28)	Interakce faktorů 1 a 2 dle softwaru Minitab [46] .....	89
Obr. 29)	DFMEA 1. část [46] .....	92
Obr. 30)	DFMEA 2. část [46] .....	93
Obr. 31)	DFMEA 3. část [46] .....	94
Obr. 32)	DFMEA 4. část [46] .....	95
Obr. 33)	PFMEA 1. část [46] .....	96
Obr. 34)	PFMEA 2. část [46] .....	97
Obr. 35)	PFMEA 3. část [46] .....	98
Obr. 36)	PFMEA 4. část [46] .....	99
Obr. 37)	PFMEA 5. část [46] .....	100
Obr. 38)	Část kontrolního plánu pro přílbu [46] .....	101

### 13.3 Seznam zkratek

METBF	mean elapsed time between failures	uplynulá střední doba mezi poruchami
MTBF	mean time between failures	střední doba mezi poruchami
MUT	mean up time	střední doba použitelného stavu
MDT	mean down time	střední doba nepoužitelného stavu
MTTR	mean time to repair	střední doba do obnovy
MOTBF	mean operating time between failures	střední doba provozu mezi poruchami
MTTF	mean time to failure	střední doba provozu do poruchy
RTY	rolling throughput yield	postupný výtěžek průchodnosti
TPY	throughput yield	výtěžek průchodnosti
FPY	first pass yield	výtěžek prvního průchodu
DPU	defects per unit	počet vad na jednotku
DPO	defects per opportunity	počet vad na příležitost
DPPM	defective parts per million	počet vad an milión dílů
PPM	parts per million	dílů na milión
LCC	life cycle cost	nákladovost životních cyklů objektů
CTQ	critical to quality	kritický kvalitativní parametr
FTA	failure tree analysis	analýza stromu poruchových stavů
FMEA	failure mode and effects analysis	analýza způsobů a důsledků poruch
FMECA	failure mode, effects and criticality analysis	analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch
PFMEA	process FMEA	procesní FMEA
SFMEA	system FMEA	systemové FMEA
DFMEA	design FMEA	konstrukční FMEA
PDCA	Deming Cycle (plan-do-check-act)	Demingův cyklus (plánuj-dělej-kontroluj-jednej)
CP	control plan	kontrolní plán
QFD	quality function deployment	dům kvality
RPN	risk priority number	číslo priority rizika
SOD	severity-occurrence-detection	závažnost-výskyt-odhalitelnost
USL	upper specification limit	horní specifikační limit

LSL	lower specification limit	dolní specifikační limit
DMAIC	define-measure-analyse-improve-control	definovat-měřit-analyzovat-zlepšit-řídít
DOE	design of experiment	návrh experimentu
VOC	voice of customer	hlas zákazníka
SPC	statistical process control	statistické řízení procesu
SIPOC	supplier-input-process-output-customer	dodavatel-vstup-proces-výstup-zákazník
OFAT	one factor at a time	jeden faktor v čase
OOPP	personal protective equipment	osobní ochranné pracovní prostředky
R&D	research and development	výzkum a vývoj