



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A

KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

Harmonizovaná FMEA analýza

HARMONIZED FMEA ANALYSIS

Diplomová práce

Master thesis

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Mikhail Riabov

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radovan Novotný,  
Ph.D.

# Diplomová práce

Magisterský studijní obor **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

*Student:* Mikhail Riabov *ID:* 192550 *Ročník:* 2 *Akademický rok:* 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

**Harmonizovaná FMEA analýza**

## **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Nastudujte nástroje a metody plánování kvality produktů, resp. procesů zaměřené na rozbor technických rizik. Pozornost zaměřte zejména na metodu FMEA, včetně přechodu na harmonizovanou metodiku VDA/AIAG. Prostudujte články, bakalářské a diplomové práce, zabývající se metodou FMEA. Popište dílčí kroky analýzy, včetně analýzy struktury systému, analýzy struktury funkcí, možných poruch, samotnou analýzu rizik a optimalizaci. Seznamte se s dostupnými nástroji SW podpory realizace a dokumentace této analýzy technických rizik s cílem popsat možnosti, které existují. Aplikaci FMEA analýzy doložte zpracovanou případovou studií, která analyticky i metodicky doloží přístup k rozboru a zmírnění technických rizik.

## **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Dle doporučení vedoucího práce

*Termín zadání:* 07. 02. 2022

*Termín odevzdání:* 24. 05. 2022

*Vedoucí práce:* doc. Ing. Radovan Novotný, Ph.D.

**doc. Ing. Lukáš Fucik, Ph.D.**  
*předseda rady studijního programu*

## **UPOZORNĚNÍ:**

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

## **ABSTRAKT**

Cílem diplomové práce na téma “Harmonizovaná FMEA analýza“ je seznámit se s principy plánování kvality a nastudovat teorii o existujících nástrojích APQP, nastudovat novou příručku harmonizované FMEA analýzy a dostupnými SW nástroji pro podporu projektu. Daná práce se zaměří hlavně na DFMEA analýzu trakční sestavy, bude popsán koncept přechodu na novou harmonizovanou verzi VDA/AIAG, která splňuje požadavky na jasný a srozumitelný výstup, požadovaný výrobcem, dodavatelem i zákazníkem. Diplomová práce je zpracována jako podrobný srozumitelný návod pro snadnější zpracování FMEA analýzy podle nové příručky.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Kvalita, plánování, FMEA analýza, technická rizika, metody kvality, vady, VDA, AIAG, metodika, odhalitelnost, harmonizace.

## **ABSTRACT**

The target of the diploma thesis on „Harmonized FMEA analysis“ is to familiarize with principles of quality planning and studying the theory of existing APQP tools. Another goal is to learn the basics of the new manual of harmonized FMEA analysis and discover some available SW tools for project support. This diploma thesis will be focused mainly on DFMEA analysis of traction assembly and the concept of changing to new harmonized version from VDA/AIAG will be explained. This concept meets the requirements for clear and comprehensible output required by the manufacturer, supplier, and customer. The diploma thesis is elaborated as a detailed clear guide for easier processing of FMEA according to the new manual.

## **KEYWORDS**

Quality, planning, FMEA analysis, technical risks, quality methods, defects, VDA, AIAG, methodology, detectability, harmonization.

## **Bibliografická citace**

Riabov, M. *Harmonizovaná FMEA analýza*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2022. 74 s., 1 příloha. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Radovan Novotný, Ph.D.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	<i>Mikhail Riabov</i>
<b>VUT ID studenta:</b>	<i>192550</i>
<b>Typ práce:</b>	<i>Diplomová práce</i>
<b>Akademický rok:</b>	<i>2021/22</i>
<b>Téma závěrečné práce:</b>	<i>Harmonizovaná FMEA analýza</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 25. května 2022

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu doc. Ing. Radovanu Novotnému PhD. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu. Také bych chtěl poděkovat RAM/LCC specialistům Pavlu Sudovi a Patriku Černému z firmy Škoda Transportation za pomoc při zpracování DFMEA analýzy.

V Brně dne 24. května 2022

.....  
podpis autora

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	8
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	9
<b>ÚVOD</b> .....	10
<b>1 PLÁNOVÁNÍ KVALITY</b> .....	11-19
1.1 PLÁNOVÁNÍ KVALITY PRODUKTŮ APQP .....	12
1.1.1 <i>Schvalování dílů k sériové výrobě PPAP</i> .....	14
1.1.2 <i>Analýza používaných systémů měření MSA</i> .....	15
1.1.3 <i>Statistická regulace SPC</i> .....	16
1.1.4 <i>Rozvíjení požadavků na kvalitu QFD</i> .....	18
<b>2 HARMONIZOVANÁ FMEA ANALÝZA</b> .....	20-36
2.1 FMEA PRODUKTŮ A PROCESŮ .....	21
2.2 STRATEGIE PŘECHODU NA HARMONIZOVANOU FMEA .....	21
2.2.1 <i>Sedmi-krokový přístup harmonizované FMEA</i> .....	22
2.2.2 <i>Přechod rizikového čísla RPN na prioritu opatření AP</i> .....	33
2.2.3 <i>Metoda pro monitorování a odezvu systému FMEA-MSR</i> .....	34
2.2.4 <i>Důraz na čtyři kategorie příčin</i> .....	35
2.3 NEVÝHODY HARMONIZOVANÉ FMEA ANALÝZY .....	36
<b>3 SOFTWAREVÁ ŘEŠENÍ</b> .....	37-39
3.1 OMNEX AIAG-VDA FMEA SOFTWARE.....	37
3.2 RELYENCE SOFTWARE PRO AIAG&VDA FMEA .....	37
3.3 APIS AIAG VDA 7-STEP FMEA .....	38
<b>4 PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	40-65
4.1 POPIS ZKOUMANÉHO SYSTÉMU .....	40
4.2 HARMONIZOVANÁ DFMEA ANALÝZA SYSTÉMU MGU .....	43
4.2.1 <i>Krok 1. Plánování projektu</i> .....	43
4.2.2 <i>Krok 2. Analýza struktury</i> .....	45
4.2.3 <i>Krok 3. Analýza funkce</i> .....	45
4.2.4 <i>Krok 4. Analýza selhání</i> .....	47
4.2.5 <i>Krok 5. Analýza rizik</i> .....	52
4.2.6 <i>Krok 6. Optimalizace</i> .....	57
<b>5 ZÁVĚR</b> .....	66
<b>LITERATURA</b> .....	68
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	71
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	73

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Fáze APQP.....	14
Obrázek 2 Variabilita systému měření.....	15
Obrázek 3 Příklad regulačního diagramu .....	17
Obrázek 4 Dům kvality .....	18
Obrázek 5 Sedmi-krokový přístup FMEA .....	22
Obrázek 6 Strom struktury .....	24
Obrázek 7 Strom funkcí.....	25
Obrázek 8 Strom selhání .....	26
Obrázek 9 Průběh FMEA-MSR.....	34
Obrázek 10 Metoda 4M .....	36
Obrázek 11 Pracovní prostředí programu AIAG-VDA FMEA .....	37
Obrázek 12 Pracovní prostředí programu Relyence.....	38
Obrázek 13 Pracovní prostředí programu APIS AIAG VDA 7-Step FMEA.....	39
Obrázek 14 MGU.....	40
Obrázek 15 Trakční motor .....	41
Obrázek 16 Schématické zapojení obvodů asynchronního trakčního motoru .....	42
Obrázek 17 Ishikawův diagram pro analýzu selhání trakční sestavy .....	51



## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Aspekty kvality .....	11
Tabulka 2 Vstupy a výstupy fáze A .....	12
Tabulka 3 Vstupy a výstupy fáze B.....	13
Tabulka 4 Vstupy a výstupy fáze C .....	13
Tabulka 5 Vstupy a výstupy fáze D.....	13
Tabulka 6 Vstupy a výstupy fáze E.....	14
Tabulka 7 Typy FMEA analýzy .....	21
Tabulka 8 Základní symboly vývojových diagramů.....	24
Tabulka 9 Kritéria hodnocení parametru S.....	26
Tabulka 10 Kritéria hodnocení parametru O.....	27
Tabulka 11 Kritéria hodnocení parametru D.....	28
Tabulka 12 Stanovení priority opatření AP .....	29
Tabulka 13 Statusy opatření .....	32
Tabulka 14 Charakteristiky MGU a pracovního prostředí .....	40
Tabulka 15 Základní parametry trakčního motoru .....	42
Tabulka 16 Definování projektu DFMEA analýzy praktické části diplomové práce .....	44
Tabulka 17 Analýza struktury.....	45
Tabulka 18 Analýza funkce .....	46
Tabulka 19 Analýza selhání .....	47
Tabulka 20 Analýza rizik .....	53
Tabulka 21 Optimalizace DFMEA.....	57

# ÚVOD

Metodika FMEA existuje už několik desetiletí a na začátku se používala především v automobilovém průmyslu. V průběhu doby se FMEA analýza vyvíjela a v roce 2019 byla představena její koncepčně nová harmonizovaná verze, na niž je zaměřena předkládaná diplomová práce. Důraz je kladen hlavně na koncept přechodu na novou příručku FMEA, která je výsledkem spolupráce mezi OEM a dodavateli Tier 1 zapojenými v rámci německého sdružení pro automobilový průmysl Verband der Automobilindustrie (VDA) a amerického sdružení pro automobilový průmysl Automotive Industry Action Group (AIAG). Přestože základem je předchozí verze FMEA analýzy, existují však některé významné aspekty postupu FMEA, které byly upraveny nebo úplně vynechány.

Zvolené téma je aktuální, vzhledem k tomu, že FMEA analýza je stále efektivní a více používána v řadě různých odvětví, jako je třeba automobilový nebo elektrotechnický průmysl, letectví, lékařství, zemědělství atd. V dnešní době se technologie rozvíjí rychle a s tím se mění požadavky na hodnocení a minimalizaci technických rizik. Proto je ještě důležitější z různých hledisek identifikovat, vyhodnocovat, analyzovat a omezovat potenciální technická rizika. Na to se používá nová harmonizovaná FMEA analýza, která je v porovnání s předchozí verzí univerzálnější a robustnější nástroj plánování kvality, pomocí kterého se dá krok za krokem identifikovat pravděpodobné příčiny selhání a následně optimalizovat zkoumaný produkt nebo proces. Postup nové FMEA analýzy má přesně definovanou strukturu a je mnohem snadnější k pochopení v porovnání s předcházející verzí.

Cílem dané diplomové práce je popsat existující metody plánování kvality a následně porovnat FMEA analýzu a její novou harmonizovanou verzi, popsat programy, které by se mohly použít při implementaci nové metodiky, následně zpracovat praktickou část diplomové práce, objektem zkoumání které bude existující systém. Dalším cílem dané práce je zpracovat FMEA takovým způsobem, aby bylo možné aplikovat tento postup na jiný libovolný výrobek.

Práce se skládá z teoretické a praktické části. V teoretické části jsou popsány základní nástroje plánování kvality. Harmonizované FMEA analýze je věnována samostatná kapitola. Praktická část obsahuje krátký popis systému a případovou studii aplikace harmonizované FMEA analýzy trakční sestavy, která představuje jádro dané diplomové práce. Realizace a splnění zadání vyžadovalo nastudování a popis realizace analýzy technického selhání v širších souvislostech plánování kvality.

# 1. PLÁNOVÁNÍ KVALITY

Kvalita finálního produktu je důležitá jak pro konečného spotřebitele, tak pro výrobce. Veškeré operace procesu plánování vycházejí z konkrétních požadavků zákazníka, které je nutné splnit, proto je vhodné uplatňovat plánování kvality v každé části životního cyklu produktu.

V tabulce 1 podle normy ČSN EN 45020 jsou definovány nejzákladnější pojmy související s kvalitou, nad kterými je potřeba přemýšlet při plánování nového produktu.

Tabulka 1 Aspekty kvality [18]

Aspekt	Vysvětlení
Použitelnost	Vhodnost výrobku pro zamýšlené použití.
Funkčnost	Schopnost produktu plnit v daném čase požadovanou funkci.
Verze	Jedná se o vedlejší znaky, které doplňují podstatnou funkci produktu, čímž mohou zvýšit zájem zákazníků.
Spolehlivost	Schopnost výrobku zajistit plnění požadované funkce po stanovenou dobu používání bez poruch a chyb.
Bezpečnost	Stav, kdy je riziko poškození osob nebo věcí omezeno na přijatelnou míru.
Design	Je důležité, aby si spotřebitel všiml konkrétního produktu. Tvar, barva a jiné parametry jsou však především věc osobního vkusu.
Technické vlastnosti	Jedná se o splnění technických požadavků, což je jedním z nejstarších znaků kvality.
Opravitelnost	Možnosti opravy, její rychlost, jednoduchost, dostupnost náhradních dílů.

Jednou z funkcí managementu kvality je tedy **plánování kvality**. To je proces, při kterém se stanovují cíle a také způsob jejich splnění. Plánování představuje řadu činností ve fázi návrhu a vývoje, jejichž výsledkem je požadovaná kvalita finálního produktu. Je známo, že 70 % chyb vzniká v předvýrobní fázi. Tyto chyby budou eliminovány právě během procesu plánování – ve fázi vývoje výrobku, procesu, ještě před uvolněním do výroby. To způsobí snížení výrobních i jiných nákladů, což znamená, že fáze návrhu a vývoje, resp. Technické přípravy výroby má významný ekonomický efekt. [11] Dá se říct, že hlavní důvody pro uplatňování plánování kvality včetně technické analýzy rizika jsou:

- zajištění spokojenosti zákazníků

- zabránění vzniku neshod při realizaci a oživení produktu a jeho používání
- odstranění chyb v předvýrobních fázích
- snížení nákladů na výrobu produktů včetně nákladů na špatnou kvalitu (COPQ)
- zvýšení konkurenceschopnosti
- prestiž organizace

Proces plánování kvality je založen na posloupnosti činností, která začíná určením potenciálních zákazníků a jejich potřeb, stejně jako požadavků vyplývajících z technických předpisů a legislativy. Tyto požadavky jsou pak transformovány na měřitelné parametry zkoumaných produktů nebo procesů. [11]

Moderní plánování kvality vyžaduje znalost souvisejících nástrojů a metod na takové úrovni, aby bylo zabezpečeno dosažení požadovaných parametrů u finálního produktu – a to na úrovni návrhu produktu, stejně jako na úrovni návrhu procesu. V další podkapitole bude rozebrán princip pokročilého plánování kvality produktu, známého pod zkratkou APQP. [19] Budou také stručně popsány nástroje plánování kvality, na což naváže kapitola věnovaná FMEA analýze. Dané nástroje pomáhají zvyšovat kvalitu, zlepšovat procesy nebo identifikovat příčiny případných selhání.

## 1.1 Plánování kvality produktu APQP

Plánování kvality výrobku je v postupu APQP definováno jako strukturovaná metoda, která je rozdělena do pěti se vzájemně překrývajících fází (viz obrázek 1) – plánování a definování programu, návrh a vývoj výrobku, návrh a vývoj procesu, validace výrobku a procesu a vyhodnocení zpětné vazby a nápravná opatření. Je zásadní, aby pracovní postupy, nástroje a analytické metody byly začleněny do cyklu plánování kvality produktu. [25] Popis jednotlivých fází:

### A. Plánování a definování programu

První fáze APQP přímo souvisí s požadavky a očekáváními zákazníků, které je potřeba pochopit před návrhem produktu a procesu. Během procesu vývoje produktu se požadavky zákazníka mohou změnit, což způsobí i změnu samotného procesu.

Tabulka 2 Vstupy a výstupy fáze A

Vstupy	Výstupy
Průzkum trhu, lessons learned, obchodní plán a marketingová strategie, studie spolehlivosti výrobků, vstupy od zákazníků.	Cíle návrhu, podpora managementu, cíle týkající se spolehlivosti a kvality, předběžná identifikace vlastností produktu a procesu

### B. Návrh a vývoj výrobku

V této fázi bude vytvořen prototyp produktu nebo služby, aby bylo možné ověřit, jestli daný produkt splňuje všechny požadavky. Tým by měl vzít v úvahu všechny konstrukční faktory, objem výroby a časový plán. Návrh musí splnit specifikované požadavky.

Tabulka 3 Vstupy a výstupy fáze B

Vstupy	Výstupy
Odpovídají výstupu z fáze plánování a definování.	DFMEA analýza, prototypový kontrolní plán, protokol o implementaci prototypu, technické výkresy a specifikace produktu, požadavky na nové přístroje a vybavení, zvláštní vlastnosti navrženého produktu.

### C. Návrh a vývoj procesu

Tato fáze je zaměřena hlavně na vývoj procesu a souvisejících s ním plánů kontroly a řízení. Návrh procesu probíhá v souladu s požadavky a očekáváními zákazníků. Splnění úkolů v této fázi závisí na kvalitě výstupů z předchozích fází.

Tabulka 4 Vstupy a výstupy fáze C

Vstupy	Výstupy
Odpovídají výstupu z fáze návrhu a vývoje produktu.	PFMEA analýza, specifikace pro balení, procesní instrukce, předběžná kvalifikační studie procesu, vývojové diagramy, plán pro MSA analýzu, uspořádání výrobních zařízení.

### D. Validace výrobku a procesu

Validace produktu a procesu se provádí na základě ověření verifikace. Tým pro plánování kvality produktu by měl určit, zda je dodržován plán kontroly a řízení. Také se ověřuje, jestli proces probíhá podle navrženého vývojového diagramu a zda produkty splňují požadavky zákazníka. Pak probíhá výrobní zkouška, která může odhalit další problémy, které je potřeba vyřešit před zahájením sériové výroby.

Tabulka 5 Vstupy a výstupy fáze D

Vstupy	Výstupy
Odpovídají výstupu z fáze návrhu a vývoje procesu.	MSA analýza, předběžná studie způsobilosti procesu, plán kontroly a řízení výroby, výrobní zkoušky, schválení dílu pro sériovou výrobu.

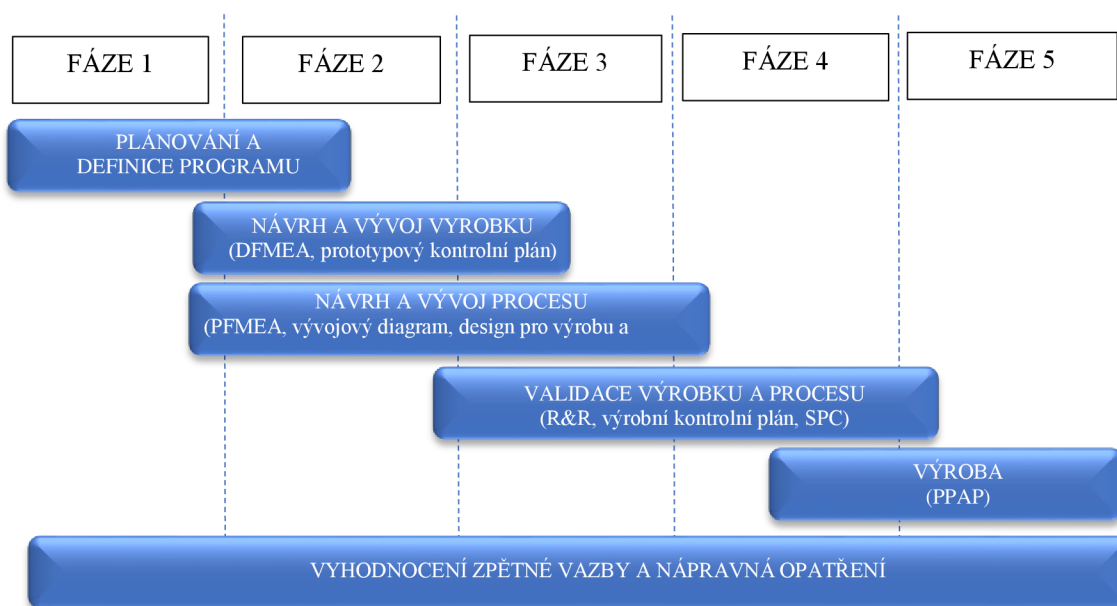
### E. Vyhodnocení zpětné vazby a nápravná opatření

Plánování kvality nekončí validací a uvolněním do výroby. V poslední fázi APQP se vyhodnotí účinnost plánování kvality produktu a v případě velké variability budou nasazena vhodná nápravná opatření. Takový přístup pomáhá zlepšovat existující procesy a lépe plnit požadavky.

Tabulka 6 Vstupy a výstupy fáze E

Vstupy	Výstupy
Odpovídají výstupu z fáze validace výrobku a procesu	Snížení variability, zvýšení spokojenost zákazníků, zlepšení produktu a služeb, efektivní využití získaných znalostí

Na obrázku 1 jsou znázorněny všechny popsané fáze postupu APQP včetně nástrojů plánování kvality, které se v jednotlivých fázích používají. Tyto nástroje budou podrobněji popsány v dalších podkapitolách.



Obrázek 1 Fáze APQP. [10]

### 1.1.1 Schvalování dílů k sériové výrobě PPAP

PPAP nebo proces schvalování výrobních dílů v podstatě není metodou ale spíše postupem, který je v průmyslu široce používán. Jde o komplexní proces, který se skládá z 18 kroků, které zajišťují, že každý díl splňuje požadavky. Stranou nestojí posouzení, zda lze kapacitně vyrábět produkt trvale splňující tyto požadavky. [24]

PPAP je zařazen do 4. fáze postupu APQP (proces validace produktu a procesu) těsně před zahájení sériové výroby. PPAP spojuje výstupy a závěry předchozích nástrojů a zajišťuje, aby každý produkt byl vyroben podle správných specifikací. Požadavky na PPAP stanovují jasné pokyny pro dodavatele a zlepšuje proces komunikace mezi dodavatelem a zákazníkem. PPAP dává jistotu, že požadavky budou splněny v průběhu výroby a minimalizuje riziko selhání. [24]

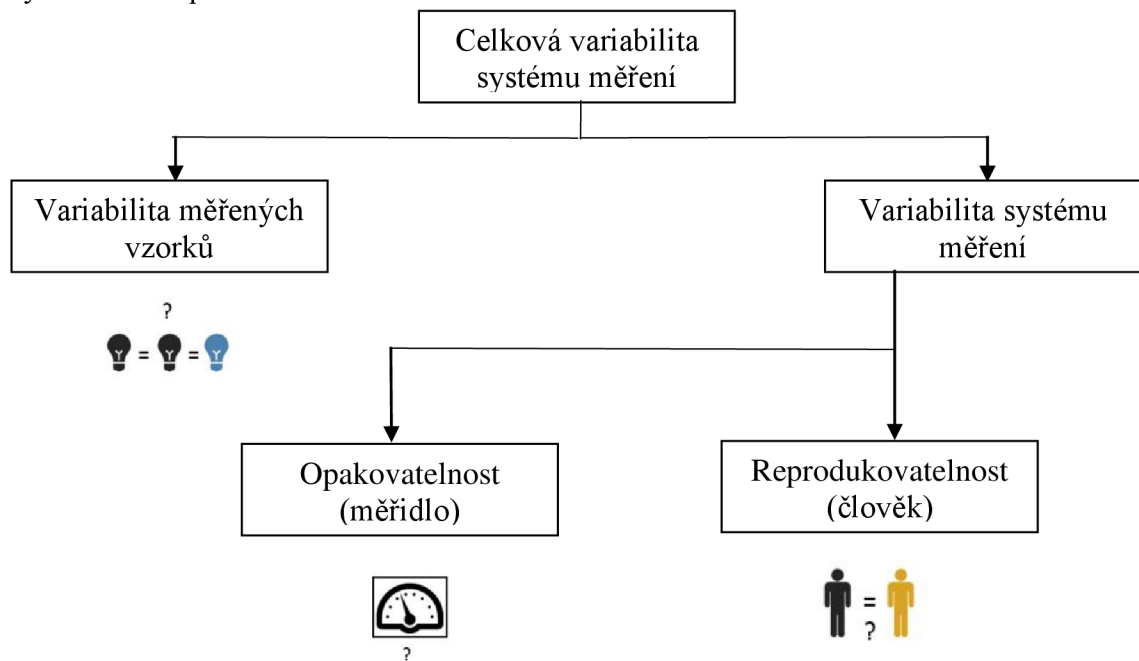
V postupu PPAP jsou definovány následující kroky, ale některé z nich mohou být vynechány. To záleží na požadavcích zákazníků a složitosti vyráběného dílu.

- 1) Konstrukční dokumentace (technické výkresy)

- 2) Oznámení o technických změnách
- 3) Schválení zákazníkem
- 4) Report DFMEA analýzy
- 5) Procesní vývojový diagram
- 6) Report PFMEA analýzy
- 7) Kontrolní plán
- 8) Report MSA analýzy
- 9) Záznamy všech provedených zkoušek
- 10) Dokumentace všech procesů, které budou probíhat
- 11) Certifikace z laboratorního testování
- 12) Kontrola vzhledu zákazníkem
- 13) Schválení vzorového dílu
- 14) Schválení finální verze produktu
- 15) Seznam všech požadovaných kontrol, které je třeba provést při výrobě, včetně kalibrace nástrojů
- 16) Specifické požadavky zákazníka
- 17) Finální PPAP report [24]

### 1.1.2 Analýza používaných systémů měření MSA

V dnešní době každá výrobní společnost zpracovává obrovské množství dat prostřednictvím měření a kontroly. Když se tato naměřená data používají k rozhodování o procesu, je důležité, aby byla data přesná. Pokud se ve vybraném systému měření objeví nějaké chyby, problém bude vyřešen na základě nesprávných údajů, což může způsobit další chyby při návrhu a výrobě nového produktu.



Obrázek 2 Variabilita systému měření. [20]

MSA (analýza systému měření) je experimentální a matematická metoda, která se používá pro ověření přesnosti a stability vybraného systému měření, posouzení vhodnosti použití konkrétních měřidel pro daný účel, ověření způsobilosti lidí, kteří měření provádějí a posouzení vybraného postupu měření. Naměřená data by měla být vyhodnocena z hlediska vychýlení, stability a linearity. Procesy, používané nástroje a operátoři jsou hodnoceni z hlediska přesnosti, opakovatelnosti a reprodukovatelnosti (R&R). Výsledky měření nesmí být ovlivněny měřidlem, osobou, která měření provádí nebo postupem měření. Analýza MSA musí být provedena před samotným měřením, tedy před samotným sběrem dat. Záleží však na charakteru problému a typu procesu. [20]

MSA analýza je založena na statistice a matematických výpočtech, což může způsobit komplikace při nasazování metod. Proto každý vysvětlující návod musí být kvalitně zpracován, výsledky jsou pak jednoduše interpretovatelné a MSA má větší přínos. Na základě výsledků MSA analýzy se stanoví potřebná nápravná opatření, například speciální školení operátorů, kalibrace nebo výměna měřicího přístroje, zavedení nového postupu měření atd. [11]

MSA analýza obvykle začíná výběrem určitého počtu vzorků (5 – 10 ks). Je to rozhodujícím parametrem, protože tento počet a samotné vybrané kusy by měly charakterizovat variabilitu procesu. Na vybraných vzorcích se opakovaně provádí měření parametrů a to různými operátory, ale za stejných podmínek měření. Pak se vyhodnotí (viz obrázek 2), jestli výsledky měření jsou stejné (opakovatelnost) a zda se jednotlivé výsledné hodnoty shodují mezi sebou (reprodukovatelnost).

Základní parametry, které se vyhodnocují v průběhu MSA analýzy:

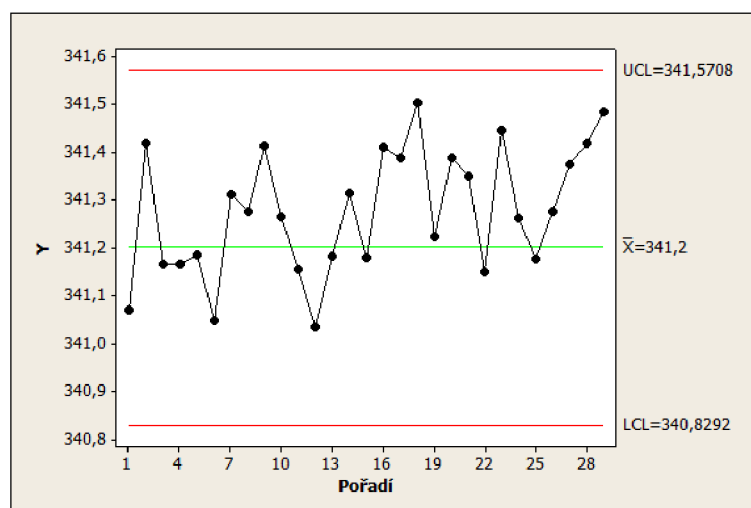
- Opakovatelnost (podle normy ČSN EN 12258-2): – shodnost za podmínek, kdy nezávislé výsledky zkoušek jsou získány stejnou metodou na identické zkušební položce ve stejné laboratoři stejným operátorem používajícím stejné vybavení v krátkém časovém intervalu.
- Reprodukovatelnost (podle normy ČSN ISO 1998-2) – kvalitativně těsnost shody mezi individuálními výsledky získanými při uplatnění normálního a správného postupu toutéž metodou na identickém zkoušeném materiálu, ale za rozdílných podmínek pro zkoušky (různí operátoři, různé přístroje a různé laboratoře).
- Strannost (podle normy ČSN P CEN/TS 16800) – rozdíl mezi očekávanou hodnotou výsledku zkoušky nebo výsledku měření a pravou hodnotou.
- Linearita (podle normy ČSN ISO 1998-6) – maximální odchylka od pomyslné rovné čáry, která spojuje nulový bod měřicího rozsahu s koncovým bodem.
- Přesnost (podle normy ČSN ISO 6107-2) – stupeň shody mezi výsledky získanými referenční metodou a výsledky získanými alternativní metodou na stejných vzorcích. [18]

### 1.1.3 Statistická regulace SPC

SPC je metoda kvality, která se používá při měření, monitorování a řízení procesů. Jedná se o posun od detekčního zkoumání statistických hodnot k hodnocení prevenčnímu. Schopnost předem zareagovat na vyvíjení změn výrobního procesu a zamezit případným negativním dopadům neshod napomáhá k neustálému zlepšování procesů. Statistická regulace je zaměřená na optimalizaci a neustálé zlepšování procesů pomocí statistických nástrojů pro analýzu naměřených dat. [11]



Nejpoužívanějším nástrojem SPC analýzy je regulační diagram (viz obrázek 3), který obsahuje všechna naměřená data, kontrolní limity daného procesu a cílovou (střední) hodnotu. Základním předpokladem SPC je, že všechny procesy mají variabilitu, která popisuje, jak jsou data rozložena kolem cílové hodnoty. [11]



Obrázek 3 Příklad regulačního diagramu. [21]

Regulační diagram podle normy ČSN ISO 6107-2 je dvourozměrný diagram pro prezentaci charakteristik metody (počtu nebo shodnosti) se zvolenými regulačními mezemi nebo mezemi získanými vyhodnocením nejistoty. [18]

Naměřená data jsou vynesena do grafu s předem stanovenými kontrolními limity (horní UCL a dolní LCL), které jsou určeny hlavně schopnostmi samotného procesu, nikoliv zákazníkem (specifikační limity). Na vodorovné ose jsou vyneseny časy kontroly jednotlivých podskupin. Na svislé ose jsou hodnoty vybraného parametru. Na regulačním diagramu také mohou být uvedeny údaje o závodu, středisku, strojích, čísle výrobku, výrobní operaci, směně nebo operátoru. Pokud data spadají do oblasti mezi kontrolními limity, to znamená, že proces probíhá podle očekávání. V opačném případě je potřeba najít příčiny variability procesu a odstranit je během optimalizace. Mezi nejčastější problémy patří: neefektivní linky, nesprávné postupy, nekvalifikovaní operátoři, nespolehlivý měřicí systém atd. [6]

Postup provedení SPC analýzy:

- 1) Definování klíčového procesu
- 2) Určení měřitelných parametrů procesu
- 3) Určení metody měření a R&R
- 4) Určení vhodné strategie při měření parametrů
- 5) Shromáždění naměřených dat a vykreslení SPC grafů
- 6) Vypočet kontrolních limitů
- 7) Monitorování změn procesu

V průběhu statistické regulace se na základě datových záznamů z výroby s ohledem na zmetkovitost a informací získaných od procesních inženýrů a pracovníků kvality určí možnosti zlepšení stability a způsobilosti procesu výroby. Bude provedena identifikace speciálních příčin

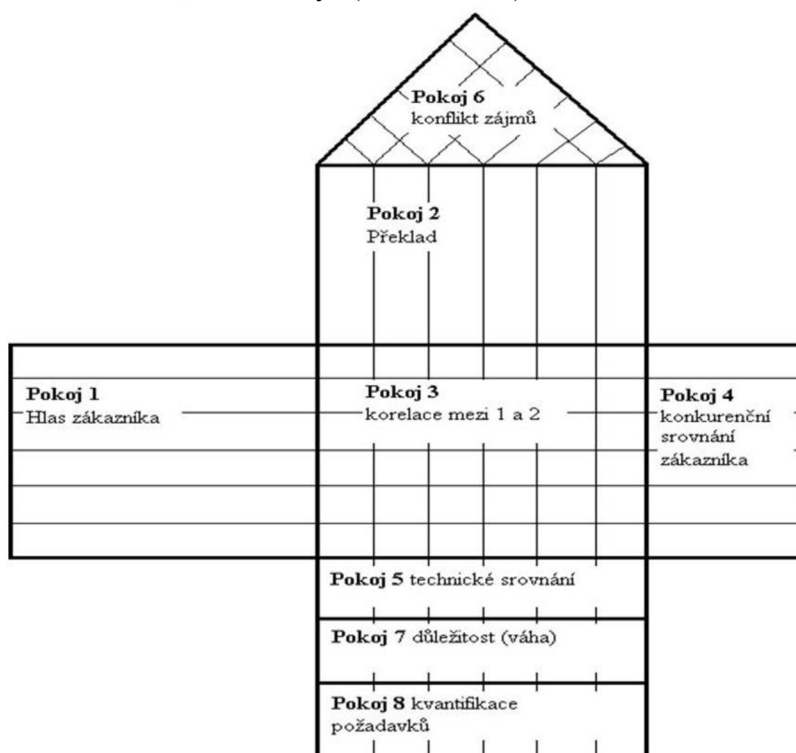
výroby neshodných produktů pomocí regulačních diagramů a dalších nástrojů kvality. Následně bude stanoven index způsobilosti procesu jako součást dokumentace, která je požadována zákazníkem.

Pomocí metody SPC dochází k eliminaci ztrát ve výrobě, snížení zmetkovosti, zlepšování kvality, snížení zbytečných nákladů na nekvalitu, zvýšení stability procesů. Parametry výrobků pak odpovídají předepsaným požadavkům, což zvyšuje i spokojenost zákazníků.

### 1.1.4 Rozvíjení požadavků na kvalitu QFD

Pochopení požadavků na kvalitu na začátku fáze plánování kvality je zásadní. QFD je efektivní metodou, která se používá v první fázi APQP, jejímž cílem je přeměnit zákaznické a jiné požadavky na technické charakteristiky produktu. Pomocí QFD dodavatel shromažďuje vstupy od zákazníka o jeho požadavcích a potřebách a plánuje, jak na ně reagovat z hlediska návrhu, vývoje, výroby, servisu a komunikace. Cílem metody QFD je vyrábění produktů v souladu s požadavky, naslouchat (slyšet) „hlas zákazníka“.

QFD se většinou zobrazuje jako matice vzájemně propojených požadavků zákazníka a vlastností produktů nebo tzv. „dům kvality“ (viz obrázek 4).



Obrázek 4 Dům kvality. [22]

Matice by měla být zpracována na zvládnutelné úrovni, což znamená, že nemusí obsahovat příliš mnoho informací, pak je mnohem jednodušší interpretovatelná. Nejprve se zjistí zákaznické požadavky, které budou vepsány do levé části matice. Podle důležitosti pro zákazníka je konkrétním požadavkům přidělena váha. V horní části matice jsou uvedeny základní vlastnosti produktu. Mezi levou a horní částí jsou pak určeny a v matici zaznamenány vzájemné vztahy. [23]

Tento proces se dá použít na úrovni celého systému, subsystému nebo dokonce komponent. Uspořádání domu kvality se ale v některých případech může mírně lišit, i když stejné základní komponenty se používají téměř v každé situaci.

Používání metody QFD má velkou výhodu pro organizace. Pomocí ní se dá posoudit, kde je společnost dnes, pokud se jedná o uspokojení přání a potřeb zákazníků. Po identifikaci silných i slabých stránek během vytváření matice je možné začít uvažovat o tom, jak tyto slabiny řešit, aniž by to nějakým způsobem ovlivnilo silné stránky. Z tohoto pohledu se dá použít výše zmíněný dům kvality.

## 2. HARMONIZOVANÁ FMEA ANALÝZA

Metoda analýzy selhání a jejich možných následků, známá pod zkratkou FMEA (vychází z anglických výrazů Failure Mode and Effect Analysis), je metodou, která se zaměřuje na minimalizaci technických rizik a selhání a pomáhá zvyšovat bezpečnost a spolehlivost výrobku nebo procesů. FMEA je určena pro analýzu možných vad produktu nebo výrobního procesu, určení příčin a následku těchto vad, hodnocení potenciálních technických rizik a stanovení preventivních opatření, která slouží k odhalování selhání ještě před jejich vznikem.

Metoda FMEA napomáhá plnit následující cíle:

- Formulování potenciálních vad, jejich příčin a následku
- Stanovení priority při řešení
- Podrobný rozbor funkcí produktu nebo kroků procesu
- Stanovení preventivních opatření a jejich ověření v praxi
- Snižování nákladů a zvyšování spokojenosti zákazníků
- Systematizace práce při návrhu nového produktu nebo procesu

FMEA je nástrojem, který je široce používán v průmyslu, ale má tato metodika několik nevýhod a omezení, protože se jedná o subjektivní metodu, která se opírá o znalosti a schopnosti týmu, které někdy nejsou dostačující pro odražení skutečné situace v plném rozsahu.

Při provádění FMEA by měla být respektována následující pravidla:

- Jednoznačnost (formulování popisu má být zřejmé, aby nedošlo k možným nedorozuměním)
- Pravdivost (následky vad by měly být popisovány výstižně)
- Reálnost (berou se v úvahu jenom rozumné příčiny selhání, nikoliv extrémní události nebo selhání, která vyplývají z úmyslného zneužití)
- Úplnost (nesmí být potenciální selhání zamlčena, projekt je zpracován v jeho plném rozsahu)

Pokud je FMEA analýza dobře zpracována, lze ji použít při následujícím návrhu obdobných produktů nebo procesů (tzv. generická či základní FMEA). Poctivě udělaná FMEA je souborem technologického a konstrukčního know-how.

V praxi se lze setkat se společnostmi, které dokázaly metodu FMEA velice efektivně používat, ale taky s firmami, kde FMEA neměla žádný přínos. To jsou nejčastější chyby při aplikaci metody FMEA, které můžou způsobit její nízkou účinnost:

- Management nepodporuje použití FMEA, např. uvolněním členů týmu.
- FMEA je zpracována oddělením kvality samostatně, nikoliv týmově.
- Příliš obecný popis následků vad.
- Význam vady je nesprávně hodnocen.
- Ishikawa diagram není používán.
- Nesprávné určení preventivních opatření.
- Striktně se bere kritická hodnota RPN. [14]

## 2.1 FMEA produktů a procesů

FMEA analýza může být aplikována s rozdílným rozsahem zkoumání nebo zaměření: nový návrh produktu nebo nový proces (v plném rozsahu), nové použití existujícího produktu, technologie nebo procesu. Kupříkladu v novém prostředí nebo novém výrobním místě. Jinou aplikací je, když vzniká částečná změna stávajícího produktu nebo procesu (kvůli technickému rozvoji nebo novým požadavkům od zákazníka).

V následující tabulce jsou popsány dva základní přístupy k FMEA analýze: FMEA návrhu produktu (DFMEA) a FMEA analýza procesu (PFMEA).

Tabulka 7 Typy FMEA analýzy [26]

DFMEA	PFMEA
DFMEA analýza se provádí ještě před konstrukcí samotného produktu. Produkt (systém) se postupně rozdělí na subsystemy a komponenty, aby bylo možné rozpoznat všechna slabá místa designu, řetězce selhání, a ošetřit je nejefektivnějším způsobem. Součástí systému mohou být softwarové, mechanické nebo elektrické subsystemy, které je taky potřeba prozkoumat. Analýzu provádí tým, který má zkušenosti s vybraným produktem.	PFMEA analýza se zaměřuje na možné vady, které mohou vzniknout během výrobních, montážních nebo logistických procesů. V rámci PFMEA je prozkoumán každý krok procesu, určují se všechny možné způsoby jeho selhání a jsou stanovena nutná preventivní opatření. Dokument PFMEA by měl být sestaven nejpozději ke dni zahájení nebo ve fázi proveditelnosti, před vlastní produkcí.

## 2.2 Strategie přechodu na harmonizovanou FMEA

FMEA se postupem času vyvíjela a pronikala do odvětví, pro které nebyla původně určena. Hromadné uplatnění našla nejen v průmyslu, kde se stala součástí projektové dokumentace technické přípravy výroby a plánování kvality a komunikace mezi dodavatelem a zákazníkem.

Vzhledem k dynamice vývoje a potřeby neustálého zlepšování dosud používané přístupy přestaly splňovat požadavky od výrobců, dodavatelů a zainteresovaných subjektů. To byl impuls pro přípravu nové verze FMEA, na níž spolupracovali dvě významná sdružení působící v automobilovém průmyslu: AIAG a VDA spolu s Tier 1. [2] Podle normy ČSN EN ISO 22300 Tier 1 (přímý dodavatel) je poskytovatelem produktů nebo služeb přímo organizaci, obvykle na základě smluvního ujednání. [18]

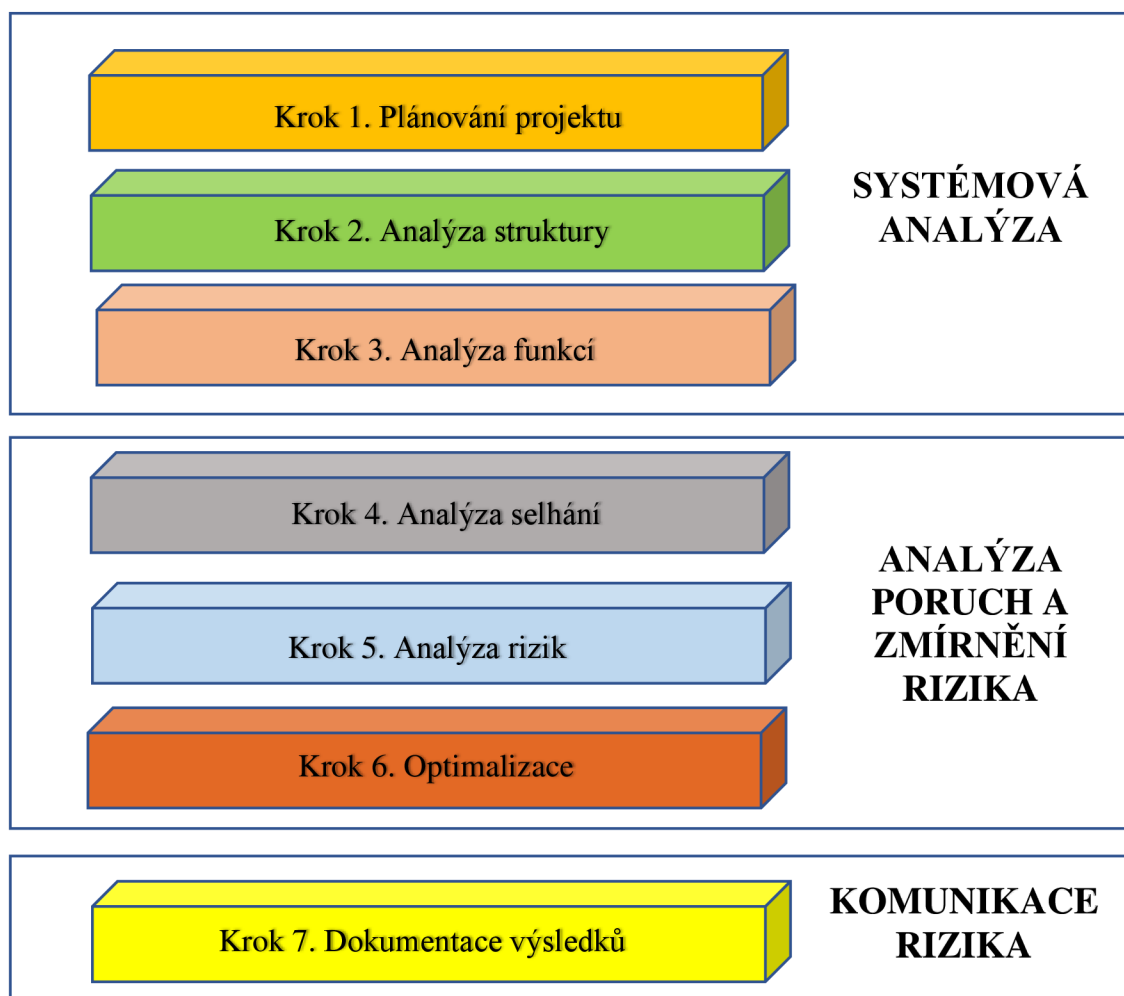
Strategie přechodu na straně dodavatelů automobilového průmyslu na novou verzi je taková, že existující FMEA analýzy, které byly kompletně zpracovány podle předchozích metodických postupů, nemusí být úplně přepracovány, mohou zůstat ve stejné podobě. Nové projekty by měly být řešeny podle nové metody FMEA, pokud zákazník nevyžaduje jiný specifický přístup, který je odlišný od dané metodiky. Doporučuje se, aby se používala základní FMEA analýza, která obsahuje znalosti organizace z předchozích podobných projektů, což by mohlo být dobrým výchozím bodem pro novou analýzu, která bude vytvořena na základě postupů uvedených v nové příručce. [13]

V následujících kapitolách jsou uvedeny hlavní rozdíly mezi původní FMEA analýzou a její novou harmonizovanou verzí AIAG/VDA.

### 2.2.1 Sedmi-krokový přístup harmonizované FMEA

Postup provádění harmonizované FMEA probíhá v sedmi logicky po sobě následujících a navzájem provázaných krocích. Toto formální rozdělení postupu FMEA pomáhá týmu efektivněji zpracovat konkrétní projekt návrhu a vývoje produktu, resp. procesu. Nedodržení posloupnosti kroků v cyklu vede k nekvalitním závěrům a neúčinným opatřením. Když je posloupnost kroků pevně dána, tým začíná pracovat systematicky a dokáže zpracovat FMEA analýzu kvalitně a do hloubky.

Zavedení sedmi-krokového přístupu minimalizuje riziko nesprávného určení případných selhání, jejich kořenových příčin a neúčinných preventivních opatření. Na druhé straně daný přístup chrání tým před vnějším tlakem na co nejrychlejší uzavření analýzy. [14]



Obrázek 5 Sedmi-krokový přístup FMEA.

## 1) Plánování projektu

Na začátku harmonizované FMEA analýzy nastupuje plánování projektu, které pomáhá s ohledem na limitované zdroje dosáhnout minimalizace rizika a zabránit nutnosti přijímat nápravná opatření. Fáze plánování projektu zahrnuje určení rozsahu projektu, zvolení objektu zkoumání FMEA (systém, subsystém, komponenta atd.), stanovení, které produkty nebo procesy budou v rámci FMEA prověřovány a vytvoření podkladů pro analýzu struktury. [15]

Plánování projektu začíná tzv. metodikou „5T“:

- Účel (inTent) nebo „Proč se dělá daná FMEA analýza?“. Nejdůležitější je, aby na začátku analýzy členové týmu plně rozuměli účelům dané FMEA.
- Termíny (Time) nebo „Kdy má být analýza kompletně zpracována?“. Aby FMEA analýza byla co nejefektivnější, měl by to být proces „před událostí“ a nikoli „po skutečnosti“, protože je mnohem snazší provést změny v návrhu nebo procesu před dokončením návrhu nebo implementací procesu.
- Tým (Team) nebo „Kdo jsou členové týmu?“. Tým FMEA by se měl skládat z členů z různých oborů, kteří mají znalosti a zkušenosti v dané oblasti. Manuál AIAG & VDA poskytuje velké množství informací o struktuře týmu, členech a jejich různých rolích a odpovědnostech.
- Úlohy (Tasks) nebo „Jaké činnosti budou provedeny?“. Sedmikrokový proces nastíněný v manuálu jasně identifikuje úkoly a výstupy v každé fázi vývoje FMEA. Tým by měl být také připraven sdílet informace s vedením v různých okamžicích procesu.
- Nástroje (Tools) nebo „Pomocí jakých nástrojů bude analýza provedena?“. Na trhu existuje mnoho různých softwarových nástrojů, které lze pro vývoj FMEA použít. V některých případech organizace vyvíjejí svůj vlastní interní software nebo používají tradiční excelové tabulky.

Plánování projektu je základním krokem pro provádění dalších kroků analýzy. Identifikace jejího hlavního zaměření se často provádí na základě předchozích zkušeností a ponaučení (Lessons Learned). Tým by měl jasně definovat, co bude do analýzy zahrnuto a co bude vyloučeno, což by mělo být zjištěno během analýzy rozhraní. [15]

## 2) Analýza struktury

Druhým krokem harmonizované FMEA je analýza struktury produktu nebo procesu, během které se provádí grafická vizualizace objektu analýzy. Systém se rozdělí na podsystémy a komponenty (DFMEA), v procesech budou definovány procesní kroky (PFMEA). K tomu slouží strom struktury, strukturní a bloková schémata nebo diagramy procesu. Formát není standardizovaný, proto se může v různých organizacích lišit včetně použití symbolů a jejich významu. Během analýzy struktury zákazník a dodavatel spolupracují na úrovni inženýrských týmů (rozhraní odpovědnosti). [15]





Strom struktury (viz obrázek 6) se dá představit jako systém hierarchicky propojených prvků, z něhož je možné snadno pochopit, jak vzájemně souvisí kroky procesu nebo komponenty produktu. Především se jedná o strukturu, ke které budou v dalším kroku přiřazeny funkce. [15]

1. Položka procesu systém, subsystém, díl, komponent nebo název procesu	2. Krok procesu číslo stanice a název prvku "Vybraný prvek"	3. Prvek provádění činnosti 4M

Obrázek 6 Strom struktury (formulář). [15]

V následující tabulce jsou uvedeny nejzákladnější symboly, které mohou být použity při sestavení vývojových diagramů procesu (Process Flow Diagram). Jak už bylo zmíněno, význam symbolů se může lišit v závislosti na druhu diagramu a standardech konkrétní organizace.

Tabulka 8 Základní symboly vývojových diagramů

Symbol	Význam
	Výrobní operace
	Transportování
	Zkouška parametrů procesu
	Skladování

### 3) Analýza funkcí

Třetím krokem harmonizované FMEA je analýza funkce. Provádí se grafická vizualizace funkčnosti produktu nebo procesu pomocí P-diagramu, stromu funkcí (viz obrázek 7) nebo vývojového diagramu a přiřazení požadavků nebo charakteristik funkcím. Následně se identifikuje kaskáda rizik od výrobce až do konečného uživatele, jsou také přezkoumána vstupní rozhraní a výstupy funkce nebo systému. Tým může propojit určité konstrukční prvky s funkčními požadavky, což se dá udělat pomocí korelační matice nebo rozvíjení požadavků na kvalitu (QFD). Aby bylo možné správně popsat funkce procesu, tým musí mít informaci o veškerých požadavcích interních, externích a finálních zákazníků. [15]

Funkce popisuje především k čemu je určen daný proces nebo krok procesu. Tento popis by měl být srozumitelný a jednoznačný pro všechny členy týmu, který provádí FMEA analýzu. Doporučený formát slovního vyjádření je kombinace infinitivu akčního slovesa a podstatného jména, které vyjadřuje funkci procesu (například *vyvrtat otvor*). Před zahájením analýzy funkcí musí být shromážděny následující informace:

- Požadavky na proces nebo produkt.



- Funkce produktu nebo procesu.
- Informace o prostředí.
- Požadavky na bezpečnost práce operátora.

Požadavek (Charakteristika) je vlastností nebo kvantifikovaným atributem vybraného produktu. Rozdílem mezi charakteristikou a funkcí je, že charakteristika může být hodnocena nebo měřena (měření charakteristik může být provedeno i poté, co je produkt vyroben) a je vytvořena na základě známé funkce. [15]

1. Funkce položky procesu Funkce systému, subsystému, dílu, komponentu nebo procesu	2. Funkce kroku procesu a charakteristika produktu (kvantitativní hodnota je volitelná)	3. Funkce prvku provádění činnosti a charakteristika procesu

Obrázek 7 Strom funkcí (formulář).

#### 4) Analýza selhání

Dalším krokem FMEA je analýza selhání, kterou je potřeba provést pro každou funkci systému. Selhání funkcí se odvozuje z charakteristik produktu, které byly definovány v předchozím kroku analýzy. Podle normy ČSN IEC 60050-192 selhání systému je ztráta schopnosti fungovat tak, jak je požadováno. [18]

V této fázi bude vytvořen tzv. řetězec selhání a pomocí Ishikawa diagramu budou definovány příslušné následky a příčiny selhání. Řetězec selhání lze nejlépe vysvětlit jako vazby mezi selháním, následky a potenciálními příčinami selhání (viz obrázek 8).

Aby bylo možné propojit selhání s jeho účinkem, měla by být položena otázka „Co se stane?“, pokud k selhání vůbec dojde. Stejným způsobem se dá propojit selhání s jeho pravděpodobnou příčinou, pokud bude položena otázka „Proč k poruše dochází?“. Následek vady vyjadřuje, co by mohl zákazník zažít nebo vnímat, pokud k selhání vůbec dojde. Tým by měl předpokládat, že návrh je správný, ale vada může nastat (nemusí), protože podle statistiky žádná událost nemůže mít nulovou pravděpodobnost. Je vhodné provést ověření úplnosti seznamu vad, což se dá udělat pomocí brainstormingu, využití zkušeností z minulých projektů nebo vyhodnocením minulých reklamací. Příčinu vady je možné brát jako skutečnost nebo událost, kvůli které se tato vada vyskytla, což znamená, že vada je její přímým následkem. Příčina je významnou částí řetězce selhání, proto by měla být popsána co nejpřesněji, aby bylo možné včas nasadit vhodná preventivní opatření. [15]

Během analýzy selhání se předpokládá spolupráce mezi zákazníkem a dodavatelem o následcích případných vad, což znamená, že v týmu by měl být takový člověk, který by danou roli splňoval. [15]

Analýza selhání je důležitým krokem celé analýzy, protože je nutné pochopit souvislosti vad, příčin a následku pro správné vyhodnocení míry rizika.

1. Následek (FE)	2. Vada (FM) v kroku procesu	3. Příčina (FC) v prvku provádění činnosti

Obrázek 8 Strom selhání (formulář). [15]

## 5) Analýza rizik

Jedním z nejdůležitějších kroků celého projektu je analýza rizik, protože právě v tomto kroku budou vyhodnocena kritéria S, O, D (význam, výskyt a odhalitelnost) a rizika podle matice priorit (AP matrix). V tomto kroku budou přiřazeny stávající preventivní opatření a opatření k odhalení neshody. V harmonizované FMEA analýze důraz je kladen na kritérium S, což předpokládá spolupráci dodavatele a odběratele hlavně o parametru „význam“. Tento parametr by se měl odhadovat pomocí speciální tabulky P1 uvedené v nové FMEA příručce. Danou tabulku se dá rozšířit podle specifických potřeb konkrétní organizace (zjednodušená verze tabulky P1 je uvedena na konci této podkapitoly, pro stanovení hodnot O a D se používají podobné tabulky P2 a P3). Pro parametry S, O, D se používají stupnice od 1 do 10, přičemž 10 vždy vyjadřuje nejvyšší příspěvek k celkovému riziku. Výsledky různých týmů by se neměly porovnávat, protože požadavky a podmínky práce se většinou taky liší, proto hodnocení je docela subjektivní. [15]

Při analýze rizik bude vyhodnocen z hlediska S, O, D každý řetězec selhání z předchozího kroku, budou aplikovány ovládací prvky detekce k řešení potenciálních příčin a způsobů selhání, následně budou stanovena potřebná preventivní opatření, což je v podstatě základem pro další krok FMEA analýzy, který se zabývá optimalizací procesu. Existují dvě rozdílné skupiny opatření: stávající preventivní opatření a stávající preventivní opatření k odhalení. [15]

Hlavní myšlenkou páteho kroku je, že jediný způsob, jak odstranit selhání, je eliminovat příčinu selhání. Jinými slovy, organizace by měla zjistit poruchu a její příčinu dříve, než se produkt dostane k zákazníkovi. [15]

Tabulka 9 Kritéria hodnocení parametru S [15]

S	Dopad	Dopad na vlastní výrobu	Dopad na závod příjemce	Dopad na koncového uživatele
10	Vysoký	Zdravotní nebo bezpečnostní riziko pro pracovníky	Zdravotní nebo bezpečnostní riziko pro pracovníky	Ovlivnění bezpečného provozu a zdraví
9		Nedodržení právních předpisů ve výrobním místě	Nedodržení právních předpisů ve výrobním místě	Neplnění právních předpisů týkajících se produktu

8	Středně vysoký	100 % výrobní dávky může být nutné sešrotovat	Odstavení linky na dobu delší než jedna směna, vyžaduje opravu nebo výměnu dílů v provozu	Ztráta primární funkce produktu
7		Sešrotování méně než 100 % výrobní dávky	Odstavení linky do délky jedné směny, vyžaduje opravu nebo výměnu dílů v provozu	Zhoršení primární funkce produktu
6	Středně nízký	100 % výrobní dávky může být nutné přepracovat mimo linku	Odstavení linky do jedné hodiny	Ztráta vedlejší funkce produktu
5		Přepracování méně než 100 % výrobní dávky mimo linku	Velká pravděpodobnost výskytu dalších vadných dílů, je požadováno třídění	Zhoršení vedlejší funkce produktu
4		100 % výrobní dávky může být nutné přepracovat přímo na lince	Nízká pravděpodobnost výskytu dalších vadných dílů, není požadováno třídění	Nepříjemný vzhled, hluk, vibrace atd.
3	Nízký	Přepracování méně než 100 % výrobní dávky přímo na lince	Velmi nízká pravděpodobnost výskytu dalších vadných dílů, není požadováno třídění	Tolerovatelně přijatelný vzhled, hluk, vibrace atd.
2		Mírné nepříjemnosti v procesu	Zanedbatelná pravděpodobnost výskytu dalších vadných dílů, není požadováno třídění	Mírné ovlivnění vzhledu, hluku, vibrace atd.
1	Velmi nízký	Neznatelný dopad	Neznatelný dopad	Neznatelný dopad

Tabulka 10 Kritéria hodnocení parametru O [15]

O	Předpoklad výskytu příčiny	Typ opatření	Preventivní opatření
10	Extrémně vysoký	Žádné	Žádné preventivní opatření
9	Velmi vysoký	Pravidla jednání	Preventivní opatření má nízkou efektivnost s ohledem na předcházení příčinám vady
8			

7	Vysoký	Pravidla jednání nebo technické opatření	Preventivní opatření má střední efektivnost s ohledem na předcházení příčinám vady
6			Preventivní opatření je efektivní s ohledem na předcházení příčinám vady
5	Střední		Preventivní opatření má vysokou efektivnost s ohledem na předcházení příčinám vady
4			
3	Nízký		Osvědčené postupy: pravidla jednání nebo technické opatření
2	Velmi nízký		
1	Extrémně nízký	Technické opatření	Preventivní opatření má extrémně vysokou efektivnost s ohledem na předcházení příčinám vady prostřednictvím návrhu produktu nebo procesu, záměr preventivních opatření – vada nemůže vzniknout z dané příčiny

Tabulka 11 Kritéria hodnocení parametru D [15]

D	Schopnost odhalit	Zralost metody odhalování	Možnost odhalování
10	Velmi nízká	Metoda zkoušení nebo kontroly není stanovena nebo není známá	Vadu není možné odhalit
9		Není pravděpodobné, že metoda kontroly nebo zkoušení vadu odhalí	Vadu lze odhalit náhodnými nebo občasnými kontrolami s malou pravděpodobností
8	Nízká	Metoda zkoušení nebo kontroly nebyla prokázána jako efektivní	Kontrola člověkem (vzhledová, hmatová, sluchová) nebo užití ručního měření (atributivních nebo spojitých veličin), která by měla odhalit vadu nebo její příčinu
7			Odhalování pomocí technického zařízení (poloautomatická kontrola s potvrzením světelnou nebo zvukovou signalizací atd.), nebo použití kontrolních zařízení jako například souřadnicové měřící zařízení, která by měla odhalit vadu nebo příčinu vady

6	Střední	Metoda zkoušení nebo kontroly byla prokázána jako efektivní	Kontrola člověkem (vzhledová, hmatová, sluchová) nebo užití ručního měření (atributivních nebo spojitých veličin), která by měla odhalit vadu nebo její příčinu
5			Odhalování pomocí technického zařízení (poloautomatická kontrola s potvrzením světelnou nebo zvukovou signalizací atd.), nebo použití kontrolních zařízení jako například souřadnicové měřicí zařízení, která by měla odhalit vadu nebo příčinu vady
4	Vysoká	Systém se ukázal jako efektivní a spolehlivý	Automatizovaná metoda odhalování, která odhalí vadu v následujících krocích zpracování produktu nebo identifikuje produkt jako neshodný, produkt postupuje procesem do místa vyřazení zamítnutých dílů, neshodný produkt bude kontrolován robustním systémem, který zabrání úniku vadných dílů z výroby
3			Automatizovaná metoda odhalování, která odhalí vadu v pracovní stanici, zabrání dalšímu zpracování nebo identifikuje produkt jako neshodný, produkt postupuje procesem do místa vyřazení zamítnutých dílů, neshodný produkt bude kontrolován robustním systémem, který zabrání úniku vadných dílů z výroby
2			Automatizovaná metoda odhalování, která odhalí příčinu vady a zabrání vzniku vady (neshodný díl) před spuštěním výroby
1	Velmi vysoká	Díl s vadou se nedá fyzicky vyrobit, návrh produktu nebo procesu nebo metody odhalování prokázaly, že odhalí vadu nebo její příčinu prakticky vždy	

Tabulka 12 Stanovení priority opatření AP [15]

Dopad na produkt	S	Předpoklad výskytu příčiny vady	O	Schopnost odhalit	D	Priorita opatření AP
Vysoký	9-10	Extremně vysoký – velmi vysoký	8-10	Nízká-velmi nízká	7-10	H
				Střední	5-6	H
				Vysoká	2-4	H

				Velmi vysoká	1	<b>H</b>
		Vysoký	6-7	Nízká-velmi nízká	7-10	<b>H</b>
				Střední	5-6	<b>H</b>
				Vysoká	2-4	<b>H</b>
				Velmi vysoká	1	<b>H</b>
		Střední	4-5	Nízká-velmi nízká	7-10	<b>H</b>
				Střední	5-6	<b>H</b>
				Vysoká	2-4	<b>H</b>
				Velmi vysoká	1	<b>M</b>
		Nízký	2-3	Nízká-velmi nízká	7-10	<b>H</b>
				Střední	5-6	<b>M</b>
				Vysoká	2-4	<b>L</b>
				Velmi vysoká	1	<b>L</b>
		Velmi nízký	1	Velmi vysoká- velmi nízká	1-10	<b>L</b>
Středně vysoký	7-8	Extrémně vysoký – velmi vysoký	8-10	Nízká-velmi nízká	7-10	<b>H</b>
				Střední	5-6	<b>H</b>
				Vysoká	2-4	<b>H</b>
				Velmi vysoká	1	<b>H</b>
		Vysoký	6-7	Nízká-velmi nízká	7-10	<b>H</b>
				Střední	5-6	<b>H</b>
				Vysoká	2-4	<b>H</b>
				Velmi vysoká	1	<b>M</b>
		Střední	4-5	Nízká-velmi nízká	7-10	<b>H</b>
				Střední	5-6	<b>M</b>
				Vysoká	2-4	<b>M</b>
				Velmi vysoká	1	<b>M</b>
		Nízký	2-3	Nízká-velmi nízká	7-10	<b>M</b>
				Střední	5-6	<b>M</b>
				Vysoká	2-4	<b>L</b>
				Velmi vysoká	1	<b>L</b>
		Velmi nízký	1	Velmi vysoká- velmi nízká	1-10	<b>L</b>

Středně nízký	4-6	Extrémně vysoký – velmi vysoký	8-10	Nízká-velmi nízká	7-10	<b>H</b>		
				Střední	5-6	<b>H</b>		
				Vysoká	2-4	<b>M</b>		
				Velmi vysoká	1	<b>M</b>		
		Vysoký	6-7	Nízká-velmi nízká	7-10	<b>M</b>		
				Střední	5-6	<b>M</b>		
				Vysoká	2-4	<b>M</b>		
				Velmi vysoká	1	<b>L</b>		
		Střední	4-5	Nízká-velmi nízká	7-10	<b>M</b>		
				Střední	5-6	<b>L</b>		
				Vysoká	2-4	<b>L</b>		
				Velmi vysoká	1	<b>L</b>		
		Nízký	2-3	Nízká-velmi nízká	7-10	<b>L</b>		
				Střední	5-6	<b>L</b>		
				Vysoká	2-4	<b>L</b>		
				Velmi vysoká	1	<b>L</b>		
		Velmi nízký	1	Velmi vysoká- velmi nízká	1-10	<b>L</b>		
		Nízký	2-3	Extrémně vysoký – velmi vysoký	8-10	Nízká-velmi nízká	7-10	<b>M</b>
						Střední	5-6	<b>M</b>
						Vysoká	2-4	<b>L</b>
Velmi vysoká	1					<b>L</b>		
Vysoký	6-7			Nízká-velmi nízká	7-10	<b>L</b>		
				Střední	5-6	<b>L</b>		
				Vysoká	2-4	<b>L</b>		
				Velmi vysoká	1	<b>L</b>		
Střední	4-5			Nízká-velmi nízká	7-10	<b>L</b>		
				Střední	5-6	<b>L</b>		
				Vysoká	2-4	<b>L</b>		
				Velmi vysoká	1	<b>L</b>		
Nízký	2-3			Nízká-velmi nízká	7-10	<b>L</b>		
				Střední	5-6	<b>L</b>		
				Vysoká	2-4	<b>L</b>		

				Velmi vysoká	1	<b>L</b>
		Velmi nízký	1	Velmi vysoká- velmi nízká	1-10	<b>L</b>
Velmi nízký	1	Velmi nízký	1	Velmi vysoká- velmi nízká	1-10	<b>L</b>

## 6) Optimalizace

Po analýze rizik následuje krok optimalizace vybraného produktu nebo procesu. V tomto kroku tým postupně rozebere výsledky analýzy rizik a určí potřebná opatření, která jsou nezbytná pro zmírnění rizik. Tým se může rozhodnout pro nasazení opatření, která zlepší výrobek, ale nemusí nutně snižovat rizika. Zvolená nápravná opatření budou následně implementována. Opatření musí být konkrétní, měřitelná a realizovatelná. Každému opatření se přiřadí termín dokončení a zodpovědná osoba, která zajišťuje realizaci opatření a garantuje, že status opatření je aktualizován (viz tabulka 13). Po nasazení preventivních opatření bude vyhodnocena jejich efektivnost. Konečným výsledkem optimalizace je proces, který minimalizuje rizika výroby. [15]

Tým by měl stanovit odpovědnosti a termíny realizace FMEA a vyjádřit se vždy k realizaci či nerealizaci všech zvolených opatření. Termíny dokončení musí být realistické a v souladu s harmonogramem projektu. Tým se taky může rozhodnout, že v daném konkrétním případě nejsou potřebná žádná opatření. Pak by to mělo být vysvětleno v záložce „Poznámky“. Optimalizační opatření jsou neúčinnější, když odstraňují efekt selhání, snižují výskyt selhání a zvyšují jeho detekci. [15]

Tabulka 13 Status opatření [15]

Status	Popis
Otevřeno	Zatím není stanoveno žádné opatření.
V rozhodování	Opatření bylo definováno, ale nebylo o něm zatím rozhodnuto.
V realizaci	Opatření stále není zavedeno, ale bylo o něm rozhodnuto.
Uzavřeno	Opatření bylo zavedeno a následně byla vyhodnocena jeho efektivnost.
Nezavedeno	Tým se rozhodl, že opatření nebude realizováno.

Pokud se opatření bude přiřazen status „uzavřeno“, má se znovu vyhodnotit parametr O a D a stanoví se nová priorita opatření, pokud je to požadováno. Podstatou optimalizace je vyhodnocení efektivnosti každého zavedeného opatření. Jen po ověření všech opatření se status „v realizaci“ může změnit na status „uzavřeno“.



## 7) Dokumentace výsledku

Posledním krokem harmonizované FMEA je dokumentace výsledků, o kterých bude diskutováno se zákazníkem, resp. odběratelem. Závěrem celého projektu je sumarizace a zejména komunikace všech dosažených výsledků, stanovení obsahu dokumentace, zdokumentování nápravných opatření a vyhodnocení jejich účinnosti.

Všechny výsledky analýzy by měly být shrnuty v závěrečné zprávě, která slouží pro komunikaci mezi odděleními organizace a také mezi organizacemi. Pro zprávu FMEA neexistuje standardní formát. [15]

Obsahem závěrečné zprávy může být: posouzení spolupráce mezi týmy a zákazníkem, shrnutí výsledku a nových znalostí v porovnání s původními cíli FMEA, posouzení splnění 5T, shrnutí zjištěných selhání a přijatých opatření ke zmírnění rizika, stručný popis použitých metod, shrnutí načasování FMEA analýzy, seznam a odpovědnosti členů týmu, popis odvození funkce atd.

Obsah dokumentace, specifické požadavky organizace, čtenářů a další podrobnosti by měly být předem dohodnuty mezi zainteresovanými stranami. [15]

### 2.2.2 Přechod rizikového čísla RPN na prioritu opatření AP

V předchozí verzi FMEA analýzy jedním z nejdůležitějších parametrů je rizikové číslo RPN (Risk Priority Number). RPN může nabývat hodnot v rozmezí od 1 do 1000 a počítá se jako součin významu, výskytu a odhalitelnosti konkrétní vady. Pak se RPN porovnává s kritickou hodnotou, která je určena zákazníkem. Tým se především zaměřuje na vady, jejichž rizikové číslo překročilo kritickou hodnotu, a následně stanovuje taková opatření, aby bylo možné to riziko maximálně snížit. Dá se říct, že RPN určovalo míru závažnosti analyzovaného problému a určovalo prioritu, s jakou je potřeba zavést preventivní opatření. [14]

V harmonizované verzi FMEA už ukazatel RPN nevyskytuje, což je správným řešením, protože RPN má několik nevýhod, jako je například přidělení stejné váhy všem třem kritériím S, O a D a subjektivnost určování RPN. Pokud se pracuje na komplexnějším a rozsáhlejším projektu je velmi problematicky určit pořadí aktivit pro preventivní opatření pouze na základě hodnoty RPN. [14]

Nové kritérium priority opatření AP (Action Priority) odstraňuje výše uvedené nedostatky. AP dává větší váhu kritériu S (Severity), tedy závažnosti, protože prevence selhání je základním záměrem minimalizace rizika. AP tabulky obsažené v nové příručce berou v úvahu všechny kombinace S, O a D. Každá organizace by měla pracovat s tabulkami významu, výskytu a detekce, které jsou uvedeny v oficiální příručce AIAG/VDA. Pokud bude potřeba tyto tabulky upravit podle specifických požadavků nebo potřeb, tým by měl pečlivě přezkoumat i tabulku priority opatření (AP). [14]

Dalším rozdílem mezi přístupem opírajícím se o číslo priority rizika (RPN) a priority opatření (AP) je rozdělení předem určených priorit do tří skupin: High, Medium a Low:

- Vysoká priorita (H) – opatření musí být definována.
- Střední priorita (M) – opatření jsou doporučena.
- Nízká priorita (L) – opatření nejsou nezbytně nutná.

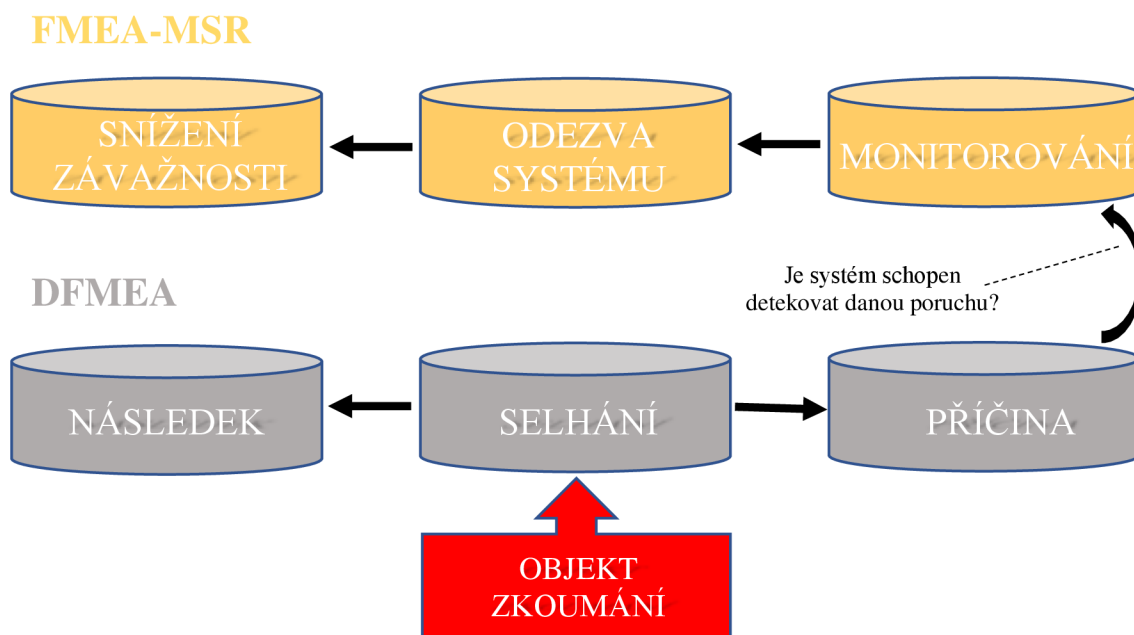
Takové rozdělení do kategorií H, M a L ještě víc konkretizuje postup nasazení opravných opatření, ale není to hlavním účelem tabulky priorit AP. Podstatou je stanovení priorit potřebnosti opatření ke snížení rizika. [14]

Přístup uvedený v nové příručce usnadnil práci týmů, protože je jasnější, která opatření mají být zavedena okamžitě a která později. Proces určování priority už není tak subjektivní.

### 2.2.3 Metoda pro monitorování a odezvu systému FMEA-MSR

FMEA pro monitorování a odezvu systému nebo FMEA-MSR doplňuje DFMEA a zvažuje, jak mohou systémy selhat, když jsou používány zákazníkem. Tato metodika by měla pomáhat udržovat systém v bezpečném stavu během provozu a fungovat v souladu s předpisy. FMEA-MSR analyzuje potenciální poruchy, které se mohou vyskytnout za normálních provozních podmínek a jejich odpovídající vliv na systém. Hlavním cílem MSR analýzy je určit, zda může koncový uživatel nebo systém zjistit selhání, pokud k němu dojde. [14]

Základem MSR analýzy je řetězec selhání, pomocí něhož jsou popsány vazby mezi samotným selháním, jeho příčinou a následkem. Pomocí MSR analýzy se monitoruje funkčnost systému, detekovatelnost poruch během provozu a schopnost ke zmírnění nebo snížení závažnosti selhání (viz obrázek 6). [14]



Obrázek 9 Průběh FMEA-MSR. [15]

V rámci standardní DFMEA se analýza rizik provádí prostřednictvím hodnocení závažnosti, výskytu a detekce. FMEA-MSR přistupuje k analýze rizik jiným způsobem. Metodika FMEA-MSR využívá SFM (Severity, Frequency, Monitoring) k odhadu rizika selhání a stanovení priority dalších opatření. Nový formát formulářů pro FMEA-MSR byl upraven tak, aby byl v souladu s metodou SFM. Metodika použití AP tabulek zůstává v zásadě stejná. [14]

MSR analýza byla přidána do nové příručky, aby byly splněny všechny bezpečnostní cíle, jak je požadováno normou ISO 26262. Tato norma se vztahuje na životní cyklus elektrických a

mechanických systémů souvisejících s bezpečností. Zatímco ISO 26262 je standardem pro automobilový průmysl, zavedení konceptů funkční bezpečnosti do studie FMEA je dobrý nápad pro jakýkoli průmyslový segment. Studie MSR využívá stejný sedmikrokový proces harmonizované FMEA analýzy definující metodiku provádění DFMEA a PFMEA s výjimkou kroku 4 (Analýza poruch) a kroku 5 (Analýza rizik). [14]

#### 2.2.4 Důraz na čtyři kategorie příčin

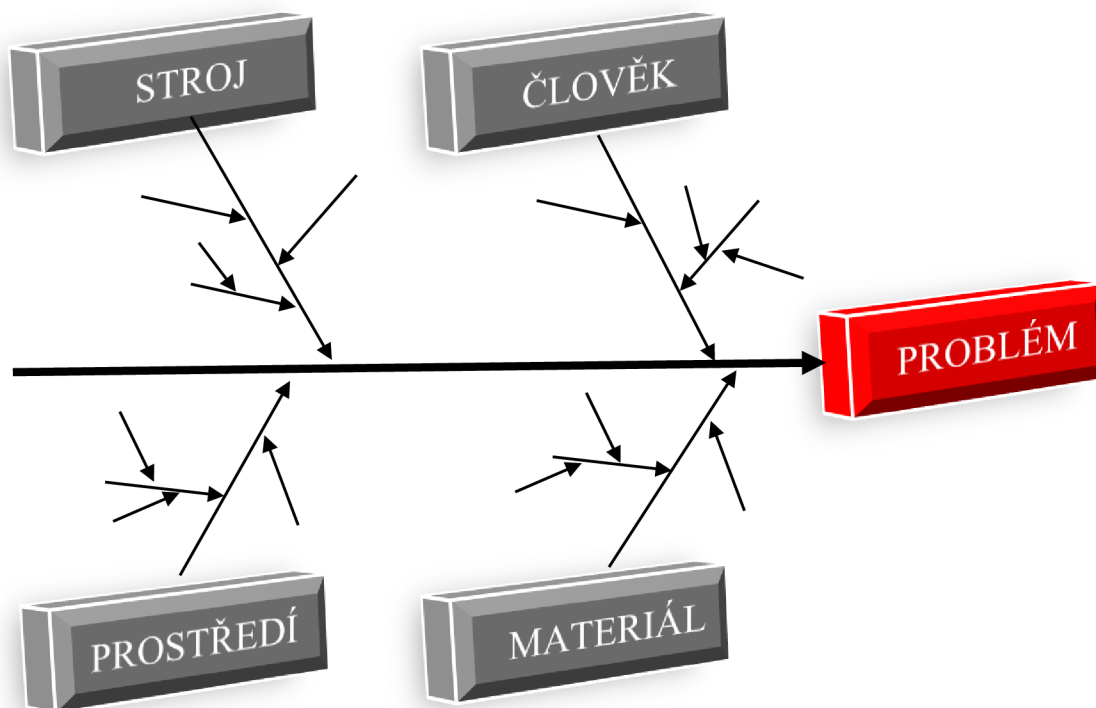
Metoda 4M se používá v systémové FMEA analýze většinou ve tvaru rybí kosti (Ishikawa diagram) a je pomocným nástrojem při určování potenciálních nebo pravděpodobných příčin selhání, které ve velkém podílu mohou nastat kvůli lidskému faktoru, organizaci práce nebo pracoviště, dobou kontroly, nesprávnému návrhu procesu nebo produktu atd.

Všechny výše uvedené a jiné potenciální příčiny mohou být seskupeny do 4M kategorií, mezi nich patří: Man (člověk), Machine (stroj), Material (materiál) a environMent (prostředí). Tyto kategorie se často používají v diagramu příčin a následků (viz obrázek 7). Pro identifikaci potenciální příčiny se používá technika brainstormingu, při kterém moderátor klade provokativní otázky, týkající se všech faktorů 4M, což podněcuje tým k přemyšlení:

- **Člověk** (obsluha stroje, pracovník nachystání materiálu, pracovník údržby atd.):
  1. Jaká je pravděpodobnost, že bude použit nesprávný díl?
  2. Je možné díl namontovat nesprávně nebo nezamontovat vůbec?
  3. Je možné díl poškodit?
  4. Je možné použít nesprávný materiál?
- **Stroj** (měřicí zařízení, zkušební zařízení, robotické nástroje, zásobníky, přípravky atd.):
  1. Dalo by se spustit stroj manuálně?
  2. Jaká je pravděpodobnost výskytu chybných vstupních dat?
  3. Je možné, že se proces nějak přeruší?
- **Materiál** (olej, pomocné látky pro výrobu, roztoky a oplachové tekutiny, montážní tuk atd.):
  1. Je možné použít nesprávný materiál?
  2. Je možné použít mnoho nebo málo materiálu?
  3. Je možné použít daný materiál na nesprávném pracovišti?
  4. Je možné nepoužít žádný materiál?
- **Prostředí** (teplota, hluk, vlhkost, prašnost, znečištění atd.):
  1. Je prostředí dostatečně bezpečné z hlediska prašnosti nebo kontaminace vzduchu?
  2. Je osvětlení vhodné pro plnění úloh?
  3. Je možné poškození dílů v důsledku vlhkosti prostředí?

Jak je zřejmé z obrázku 10 možné příčiny jsou prezentovány i na různých úrovních (připojených větvích). Vnější větve jsou příčinou vnitřních větví, nejvzdálenější větve určují potenciální příčinu ve větším detailu.

Pomocí metody 4M se dá analyzovat existující problémy, určovat jejich hlavní příčiny, zvyšovat znalosti o procesu a jeho parametrech. Jedná se o nástroj, který se zaměřuje spíše na kauzalitu, spíše na příčiny, než na příznaky či symptomy. [15]



Obrázek 10 Metoda 4M.

### 2.3 Nevýhody harmonizované FMEA analýzy

- 1) Jedním z hlavních problémů nové příručky je software. Cílem autorů harmonizované FMEA byla možnost využívat pro dokumentaci i nadále Excel, proto základní FMEA formuláře byly zpracovány právě jako .xls soubory. Praktické použití těchto formulářů je ale nepřehledné, zdlouhavé a obtěžující. Harmonizovaná verze FMEA je mnohem rozsáhlejší, proto je obtížnější orientace v analýze, kontrola, revize a náprava nelogičností při zpracování. [13]
- 2) Dalším problémem je možnost výběru z několika formulářů. Takový přístup je matoucí a může mít za následek zbytečné diskutování o tom, jaký formulář by měl být finálně použit, proto by bylo lepší jít cestou jednoho jediného formuláře pro všechny organizace.
- 3) Terminologie v nové příručce je zbytečně složitá. Český překlad to zkomplikoval ještě víc, protože každý pojem může být přeložen několika způsoby, což přináší běžnému pracovníku další otázky. [13]
- 4) Harmonizovaná FMEA analýza je stále dost subjektivní, jako i předchozí verze, protože matice AP je v příručce navržena znovu na základě tabulek S, O, D. Kvůli tomu, že spousta organizací stále bude používat svoje vlastní hodnoticí tabulky, které jsou vhodné jenom pro jejich specifické výrobky nebo procesy, navržená AP matice už nebude univerzální pro všechny, a proto nebude použitelná. [13]
- 5) Dalším problémem nového přístupu je ocenění rizika kategoriemi High, Medium a Low. Vzhledem k tomu, že je teď potřeba se fakticky vyjadřovat ke každému řádku FMEA analýzy, to bude znamenat větší nároky na časové, finanční i lidské zdroje při provádění FMEA. [13]

### 3. SOFTWAREOVÁ ŘEŠENÍ

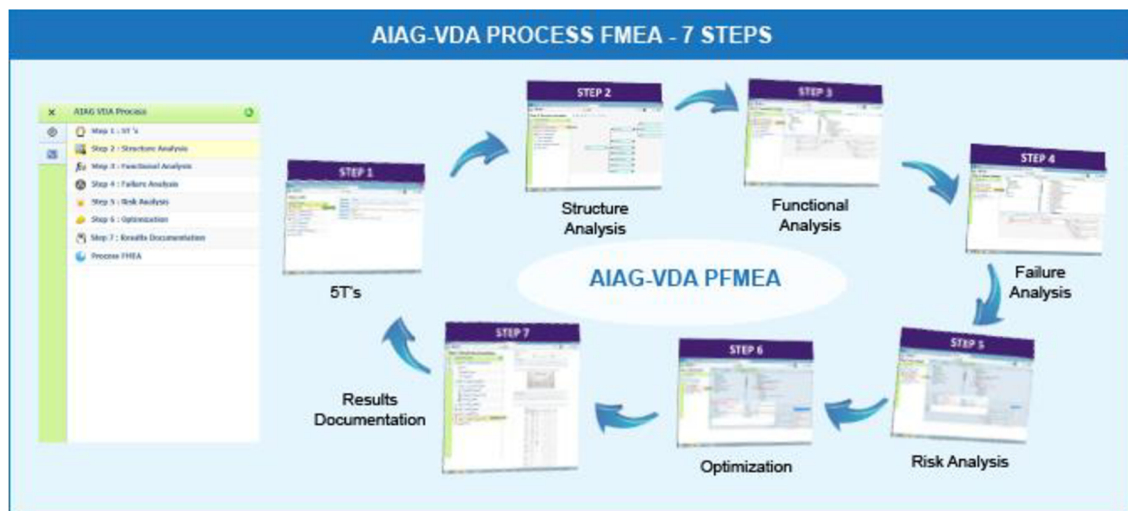
V této kapitole jsou popsána některá softwarová řešení, která lze použít pro rozvoj DFMEA nebo PFMEA a sledování opatření. Jsou to programy, které obsahují celou řadu specializovaných funkcí a jednoduchých softwarových nástrojů. Některé organizace se zabývají tím, že rozvíjí svoje vlastní databázová řešení a vytváří software. Každý člen týmu, který provádí FMEA analýzu by měl mít znalosti týkající se vybraného nástroje požadovaného organizací v konkrétním projektu.

#### 3.1 OMNEX AIAG-VDA FMEA SOFTWARE

První software, který je v souladu s harmonizovanou verzí FMEA analýzy, byl navržen společností Omnex. Program **AIAG-VDA FMEA** (viz obrázek 11) pomáhá společnostem analyzovat selhání a zmírňovat rizika ve fázi procesu i návrhu FMEA. [7]

Společnost Omnex přijala změny FMEA s pečlivostí, aby uživatelům softwaru poskytla ty nejlepší služby. Program AIAG-VDA FMEA poskytuje intuitivní snadno použitelné rozhraní pro vývoj a správu FMEA a je doplňkem softwaru **AQUA PRO**. [7] Software také poskytuje následující klíčové funkce:

- Týmy mohou spolupracovat v reálném čase online.
- Inovativní přístup k propojení funkcí jediným kliknutím.
- Vícenásobný a širší pohled na funkční analýzu a analýzu poruch.
- Strukturovaná a tabulková reprezentace všech informací.
- Vizualní vykreslování z různých úhlů pohledu na to, jak se funkce a porucha vzájemně ovlivňují.



Obrázek 11 Pracovní prostředí programu AIAG-VDA FMEA.

#### 3.2 RELYENCE SOFTWARE pro AIAG & VDA FMEA

V Relyence FMEA (viz obrázek 12) je možnost do svých pracovních listů FMEA přidat prioritu opatření (AP). AP se dá použít místo priority rizika (RPN) nebo ve spojení s RPN.

V tomto programu je taky možné vytvořit svůj vlastní systém hodnocení závažnosti (S), výskytu (O) a detekce (D) nebo spolehnout si na výchozí nastavení programu. V případě, pokud je potřeba přidat další úrovně AP nebo změnit kritéria pro stanovení hodnocení AP, dá se to udělat pomocí funkce přizpůsobení priority. Ve svých pracovních listech FMEA je možné také zvolit svoje vlastní barevné označení úrovně priority pro lepší přehlednost. [8]

	Severity		Occurrence		Detection		Level
	Lower Bound	Upper Bound	Lower Bound	Upper Bound	Lower Bound	Upper Bound	
1	9	10	8	10	7	10	H
2	9	10	8	10	5	6	H
3	9	10	8	10	2	4	H
4	9	10	8	10	1	1	H
5	9	10	6	7	7	10	H
6	9	10	6	7	5	6	H
7	9	10	6	7	2	4	H
8	9	10	6	7	1	1	H
9	9	10	4	5	7	10	H
10	9	10	4	5	5	6	H
11	9	10	4	5	2	4	H
12	9	10	4	5	1	1	M
13	9	10	2	3	7	10	H
14	9	10	2	3	5	6	M
15	9	10	2	3	2	4	L
16	9	10	2	3	1	1	L
17	9	10	1	1	1	10	L
18	7	8	8	10	7	10	H
19	7	8	8	10	5	6	H
20	7	8	8	10	2	4	H

Obrázek 12 Pracovní prostředí programu Relyence.

#### Výhody softwaru Relyence oproti excelovým tabulkám:

Používání excelových tabulek při FMEA analýze má značné nevýhody ve srovnání s nástrojem navrženým speciálně pro účely FMEA. Excel není zaměřen na týmovou práci a v případě příliš rozsáhlého projektu se excelové tabulky vypadají úplně nepřehledně. [8]

Oproti tomu software Relyence FMEA je navržen s ohledem na organizaci a efektivitu a poskytuje všechny funkce potřebné pro podporu týmového přístupu k FMEA. [8]

### 3.3 APIS AIAG VDA 7-Step FMEA

APIS vyvíjí software FMEA od roku 1988. Při návrhu svých produktů se zaměřují na přehlednost společných souborů, které se dá prohlížet v různých editorech podle toho, co chce uživatel analyzovat a upravovat. To uživateli umožňuje soustředit se na určité aspekty FMEA do detailu a zároveň zachovat přehled o celém projektu. [9]

Původní pět kroků procesu vývoje FMEA zůstávají jako kroky 2-6 aktualizovaného 7-krokového procesu. Aby bylo možné zdokumentovat, kterým prvkům produktu nebo procesu je věnována pozornost FMEA a proč, zavedl APIS nový editor: „FMEA Scope Analysis“. Zde je

možné zadat data relevantní pro konkrétní projekt a určit, které prvky vyžadují či nevyžadují další analýzu. Protože IQ-Software propojuje informace ze všech editorů, je možné propojovat data z existujících souborů. Totéž platí pro další editory, jako je Editor blokových diagramů, kde lze importovat grafiku, jako jsou například diagramy rozhraní, které dále pomáhají porozumět danému projektu. [9]

IQ-RM PRO - APIS Informationstechnologien GmbH [10000-50] - Management-Report: Monthly FMEA report - PEN

Monthly FMEA report

The following monthly report conveys the status of key figures and details from the FMEA.  
The parameters used are determined by the following internal guidelines:

- INT 10
- INT 50

**General info**

FMEA Project:	PEN
Date evaluated:	30.01.2020

**Maturity level of FMEA using Quality Rules**

Field labels	Value (Hits)	Value (All)	Value (%)
System elements without functions:	6	20	30,00
Functions and characteristics without failures:	5	47	10,64
Top failures with missing S rating:	0	12	-
Base failure(s) with missing action type:	2	19	10,53
Revision states with critical risk-matrix rank:	11	23	47,83
Actions without a responsible and deadline:	10	23	43,48

**Current status of deadlines**

Maßnahmen insgesamt:	53
Open deadlines (all responsables):	8
Percentage of open deadlines (all responsables):	15,09 %
Overdue deadlines (all responsables):	0

**Current risk levels**

Action Priorities	Value
AP = H:	2
AP = M:	3
AP = L:	6

**Statistics**

Frequency analysis AP

Obrázek 13 Pracovní prostředí programu APIS AIAG VDA 7-Step FMEA.

Jakmile je proces optimalizace dokončen, je důležité sdělit výsledky analýzy, aby bylo možné ověřit úroveň zpracování FMEA a jak byla identifikována a snížena rizika. IQ-Software (viz obrázek 13) poskytuje několik způsobů, jak toho dosáhnout. To zahrnuje použití Web Publisheru k vytváření souborů HTML vybraných analýz nebo celé FMEA připravené pro webový prohlížeč nebo export dat do excelovského souboru. [9]

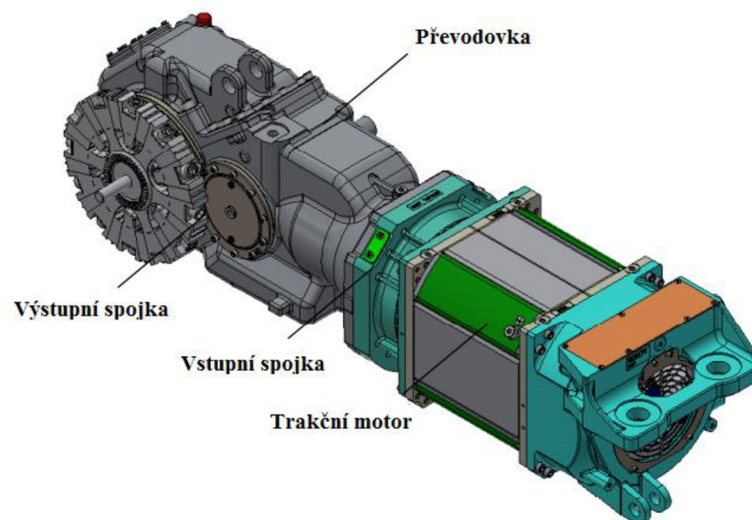
## 4. PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část dané diplomové práce je zaměřená na DFMEA analýzu trakčního systému MGU pro nízkopodlažní tramvaj. Analýza je provedena při spolupráci s výrobní a vývojovou společností Škoda Transportation v Plzni. Všechny údaje uvedené v praktické části diplomové práce jsou fiktivní a znázorňují střední hodnoty parametrů používaných trakčních motorů.

Kvůli rozdělení DFMEA analýzy na kroky v souladu se sedmi-krokovým harmonizovaným přístupem je výstup realizované analýzy přehledný ve formátu tabulkového procesoru. Kompletní DFMEA analýza, která byla realizována je v příloze č. 1.

### 4.1 Popis zkoumaného systému

System MGU se skládá z trakčního motoru, vstupní spojky, dvoustupňové převodovky a výstupní spojky (viz obrázek 14). Výstupní spojka je opatřena čelním ozubením, které přenáší točivý moment na dvojkolí. MGU je uchycena do rámu podvozku pomocí třech silentbloků.



Obrázek 14 MGU.

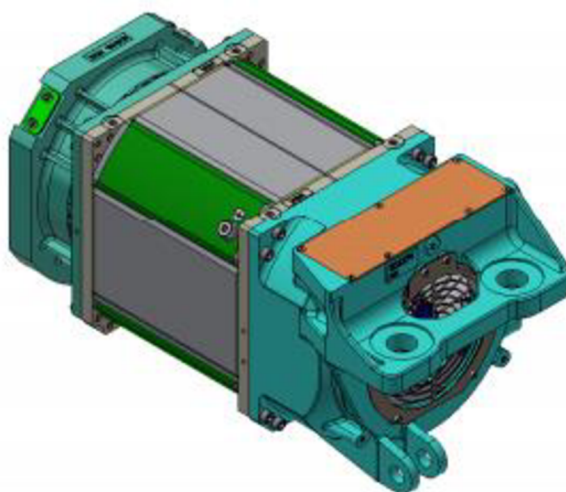
Tabulka 14 Charakteristiky MGU a pracovního prostředí

Parametr	Hodnota	Jednotka
Maximální rychlost	85	km/h
Maximální provozní rychlost	80	km/h
Maximální moment na hřídeli motoru	1000	Nm
Teplota okolí v provozu	-25 až 40	°C
Maximální nadmořská výška	1400	m a. s. l.



Průměrná relativní vlhkost vozidla	75	%
Maximální relativní vlhkost	100	%
Životnost	25	let
Nájezd vozidla	50000	km/ 1 rok
Hladina akustického výkonu	95	dB(A)
Střední doba mezi poruchami MTBF	185000	h

Hlavním objektem zkoumání je trakční motor (viz obrázek 15). V rámci této diplomové práce byl rozebrán čtyřpólový třífázový asynchronní jednoložiskový motor s kotvou nakrátko. Hřídel trakčního motoru je připravená pro montáž spojky. Izolační systém použitý pro statorové vinutí je v teplotní třídě 200. Účelem zařazení látek do teplotních tříd je správné provedení elektrických rozvodů v prostředí s nebezpečím výbuchu. Rotor trakčního motoru je uložen v jednom válečkovém ložisku a má měděnou klec nakrátko. Ložisko je odolné proti ložiskovým proudům.



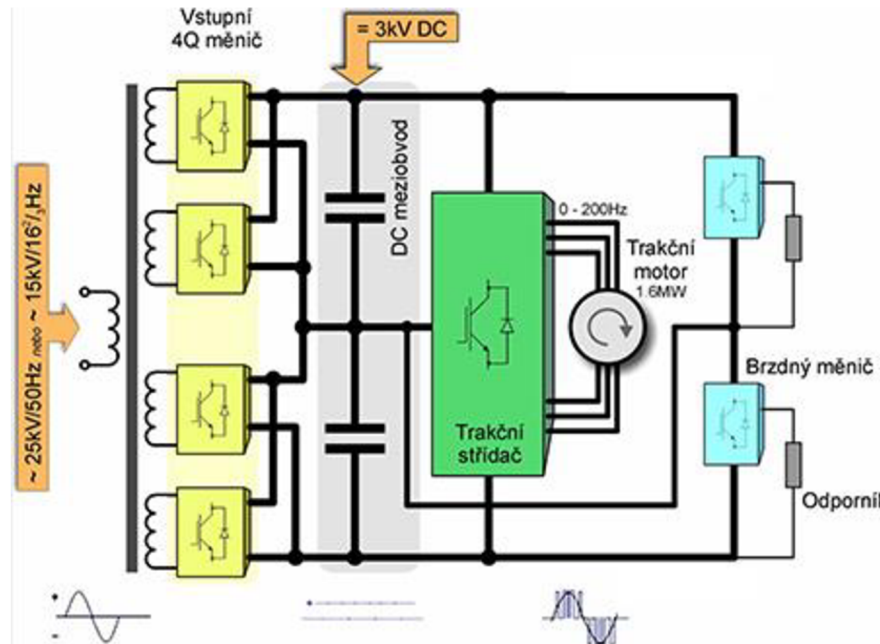
Obrázek 15 Trakční motor.

Součástí daného motoru je jeho vlastní ventilační a chladicí systém IC41, což znamená, že ventilace trakčního motoru je realizována pomocí vlastního ventilátoru, který je umístěn na hřídeli trakčního motoru a pracuje v obou směrech otáčení. Chladicím médiem je vzduch, jehož maximální vstupní teplota nemusí překročit +40 °C.

Celý systém je navržen pro zdroj napětí s proměnnou frekvencí a sinusovým tvarem vlny. V daném konkrétním případě se jedná o napájení z trakčního měniče s proměnným kmitočtem (viz obrázek 16), který v dnešní době obsahuje řídicí obvody s IGBT prvky. Před tím se používaly tyristorové komutační obvody. S dalším rozvojem polovodičových technologií, které se zaměřovaly na velké rozsahy výkonů, se u vlaků začaly používat hlavně napěťové střídače (viz obrázek 16).

Trakční měnič poskytuje následující ochranu trakčního motoru:

- Ochrana při poruše izolačního systému
- Ochrana proti přehřátí v reálném čase (monitorování teploty statorového vinutí)
- Ochrana proti přetížení (omezení točivého momentu)
- Ochrana proti překročení maximálních otáček



Obrázek 16 Schématické zapojení obvodů asynchronního trakčního motoru. [17]

U modernějších vlaků jsou trakční motory napájeny z čtyřkvadrantových napěťových měničů. Pak signál prochází měničem frekvence, který se skládá z následujících základních částí: usměrňovač, meziobvod, střídač a řídicí počítač, který je taky součástí trakčního měniče. Hlavním důvodem pro použití měniče frekvence je potřeba plynulé regulace otáček trakčního motoru.

DC meziobvod, což je v daném případě pulzní usměrňovač vytváří pulzující stejnosměrné napětí. Ve střídači se stejnosměrné napětí přetváří na střídavé s proměnnou frekvencí a reguluje se jeho velikost. Trakční střídač je možné představit jako sestavu vypínatelných polovodičových součástek, které střídavě připojují k trakčnímu motoru (zátěži) kladný nebo záporný pól zdroje.

V tabulce 15 jsou uvedeny základní parametry trakčního motoru.

Tabulka 15 Základní parametry trakčního motoru

Parametr	Hodnota	Jednotka
Maximální konstrukční otáčky	5000	RPM
Maximální provozní otáčky	4700	RPM
Teplotní třída	200	-
Hmotnost	~350	kg
Moment setrvačnosti	0,5	kg.m <sup>2</sup>
Spojení vinutí	Y	-

Výkon	100	kW
Účinnost	93,5	%
Sdružené napětí	3×420	V AC
Hlavní indukčnost	4,5	mH

Trakční motor je vybaven snímačem teploty umístěným v zubu statoru a dvěma otáčkovými čidly Noris FAHU, která pro svou činnost používají Hallův princip nebo princip vířivých proudů. Snímač teploty obsahuje 2 snímače teploty Pt100, což je platinovým odporovým teploměrem. Měření teploty je založeno na změně odporu platiny vlivem teploty. Platina se volí, protože její odporová charakteristika vykazuje lineární chování. Daný druh snímače je napájen konstantním proudem, a proto je možné změnu odporu odvodit ze změny napětí. Proud se volí nejnižší možný, aby se minimalizovalo vlastní zahřívání odporového snímače. Výše uvedené prvky jsou v souladu s normou elektromagnetické kompatibility EN 50121-3-2:2006.

Dvoustupňová kuželo-čelní převodovka je spojena vstupní spojkou s trakčním motorem a výstupní spojkou s nápravou. Výstupní spojka přenáší točivý moment a zároveň vyrovnává relativní pohyby mezi převodovkou a dvojkolím. Převodovka je vybavena uchycovacími body pro upevnění zákrytu podvozku.

Pro spojení hřídele rotoru trakčního motoru s pastorkovou hřídelí převodovky se používá vstupní spojka membránového typu. Vstupní spojka je na straně motoru opatřena izolací, která zabraňuje průchodu ložiskových proudů směrem do převodovky, a prokluzovým pouzdem na straně převodovky, aby se zabránilo poškození ozubení způsobenému zkratovými momenty. Obě poloviny vstupní spojky jsou nalisovány na příslušnou hřídel a propojeny šroubovým spojením.

Ke spojení MGU s nápravou se používá výstupní spojka typu zubovo-paketová. Výstupní spojka přenáší točivý moment přes čelní ozubení a je zajištěna k nápravě dvojkolím centrálním šroubem.

## 4.2 Harmonizovaná DFMEA analýza systému MGU

### 4.2.1 Krok 1. Plánování projektu

Praktická část práce prezentuje úsilí na vytváření DFMEA analýzy trakční sestavy MGU ve spolupráci s odborníky z firmy Škoda Transportation.

Během DFMEA je potřeba určit nejčastější selhání trakčního motoru a dalších pomocných elementů konstrukce MGU, definovat příčiny těchto vad, určit efektivní způsoby snížení hlučnosti motoru, analyzovat stávající preventivní opatření k příčinám a jejich detekci, nasadit další nápravní opatření ke zlepšení funkčnosti sestavy ve správném pořadí, které se určí podle parametru AP.

Provedení DFMEA analýzy se nutně opírá o technickou dokumentaci, jako je předcházející FMECA analýza trakčních motorů, technická specifikace motorů, kusovník konstrukčních dílů sestavy, analýza kritičnosti trakčních motorů a zdrojová data monitorování funkčnosti jednotlivých součástí.

Účelem dané FMEA analýzy není zavedení úplně nových procesů při výrobě, montáži komponent, údržbě nebo skladování ale pouze zlepšení stávajících procesů, případně vylepšení designu sestavy. Jedná se o návrh při zavedení nových opatření, nikoliv reálné změny zkoumaného

výrobku kvůli omezením při procesu schvalování. Návrh musí být prioritně zaměřen na zvýšení spolehlivosti citlivých součástek, snížení hlučnosti elektrického motoru a dalších komponent a bezpečnost pracovníků.

Základní informace o rozsahu dané DMEA analýzy:

- **Název organizace:** Škoda Transportation a.s.
  - **Výrobní místo:** Česká republika, Plzeň 3 – Jižní Předměstí, náměstí Emila Škody 2922/1, 301 00
  - **Modelový rok:** 2022
  - **Předmět:** Konstrukce trakční jednotky
  - **DFMEA datum zahájení:** 6. dubna 2022
  - **DFMEA datum revize:** 24. května 2022
  - **Průřezový tým:** Pavel Suda (RAM/LCC specialista Škoda Transportation)  
Patrik Černý (RAM/LCC specialista Škoda Transportation)  
Mikhail Riabov (zkušební technik Škoda Transportation)
  - **DFMEA identifikační číslo:** 192550
  - **Odpovědnost za provedení analýzy:** Mikhail Riabov (zkušební technik Škoda Transportation)
  - **Třída ochrany informace:** důvěrné
- Při plánování projektu byla použita metodika „5T“. (viz tabulka 16)

Tabulka 16 Definování projektu DFMEA analýzy praktické části diplomové práce

Parametr	Popis
Účel (inTent)	Přezkoumání pro odstranění možných závad a chyb trakčního systému. DFMEA se zaměří na konstrukční a funkční vady trakčního motoru, který se používá pro nízkopodlažní tramvaj.
Termíny (Time)	Termín odevzdání kompletní DFMEA analýzy je květen 2022.
Tým (Team)	Členové týmu jsou: 1) Pavel Suda (RAM/LCC specialista Škoda Transportation) 2) Patrik Černý (RAM/LCC specialista Škoda Transportation) 3) Mikhail Riabov (zkušební technik Škoda Transportation)
Úlohy (Tasks)	1) Provést sedm kroků harmonizované DFMEA analýzy 2) Vytvořit přehledný excelovský soubor DFMEA analýzy
Nástroje (Tools)	1) Excel

#### 4.2.2 Krok 2. Analýza struktury

Během analýzy struktury byl zkoumaný systém pro přehlednost rozdělen na dva subsystémy: samotný trakční motor plnící hlavní funkci a pomocné elementy konstrukce MGU, které plní funkce vedlejší. Dalším krokem analýzy struktury bylo rozčlenění výše uvedených subsystémů na prvky provádění činnosti (viz tabulka č. 17). Rozčlenění systému bylo provedeno způsobem, aby bylo možné definovat všechna selhání na požadované úrovni rozlišení.

Součásti trakčního motoru jsou: stator, rotor a snímače teploty a otáček, které jsou upevněny přímo na motoru. Senzory do analýzy zahrnuty kvůli zkušenostem z praxe. Pravděpodobnost poruchy těchto součástí je větší kvůli jejich citlivosti a náročným provozním podmínkám. Pomocné elementy jsou: vstupní a výstupní spojka, dvoustupňová převodovka, systém chlazení a ventilace motoru a silentbloky, sloužící k uchycení trakčního motoru v podvozku.

Tabulka 17 Analýza struktury

System	Subsystem	Prvek provádění činnosti
MGU (Elektrická trakce)	Trakční motor	Stator
		Rotor
		Snímač otáček
		Snímač teploty
	Pomocné elementy konstrukce MGU	Vstupní spojka
		Dvoustupňová převodovka
		Výstupní spojka
		System chlazení
		Silentbloky

#### 4.2.3 Krok 3. Analýza funkce

Dalším krokem DFMEA je analýza funkce dílčích prvků definovaných v předchozím kroku. Každému prvku systému byla přiřazena odpovídající funkce.

Analýza funkce je základem pro analýzu rizik, celkový výstup je uveden v excelovském souboru v příloze č. 1 této práce. Každá funkce je vyjádřena srozumitelně a jednoznačně. Některým prvkům systému bylo přiřazeno více funkcí, což umožní definovat více možných vad či selhání a jejich příčin.

Funkci celého zkoumaného systému lze vyjádřit všeobecně: trakční jednotka MGU se používá pro pohon tramvaje. Pro zjednodušení dalšího zkoumání byl systém rozdělen na dva subsystémy: trakční motor, který plní hlavní funkci, což je přeměna elektrické energie na mechanickou a pomocné elementy konstrukce, které slouží pro uchycení a zapojení trakčního motoru, propojení základních elementů konstrukce a zabezpečení přenosu točivého momentu na pohon tramvaje. Následně byly přiřazeny funkce jednotlivým prvkům zmíněných subsystémů (viz tabulka 18, což vede k detailní analýze selhání v kroku 4, kde potenciální selhání jsou způsoby, jak by mohly funkce selhat v negativním smyslu slova.

Tabulka 18 Analýza funkce

Funkce systému	Funkce subsystému	Funkce prvku provádění činnosti
<p>Je určen pro pohon tramvaje. Datová komunikace s VCU pomocí instalovaných čidel.</p>	<p>Je určen na pohon tramvaje. Realizuje přeměnu elektrické energie na mechanickou a zabezpečuje přenos točivého momentu na pohon a brždění hnacího dvojkolí.</p>	<p>Pevná část elektromotoru. Tvoří část magnetického obvodu a vytváří rotující se magnetické pole. Indukuje indukovaný proud na rotoru a tím jej uvádí do pohybu.</p>
		<p>Pohyblivá část elektromotoru. Tvoří část magnetického obvodu. V ose rotoru prochází hřídel, pomocí níž se přenáší točivý moment elektromotoru k dalšímu využití.</p>
		<p>Poskytuje snímání otáček trakčního motoru. Spolehlivě detekuje klidový stav vozidla. V případě jeho pohybu generuje impulzy pro detekci a další zpracování.</p>
		<p>Poskytuje snímání teploty trakčního motoru. Signalizuje VCU o přehřátí motoru a poskytuje jeho nouzové vypnutí v případě poruchy.</p>
	<p>Uchycení, připojení elektromotoru, propojení základních elementů konstrukce, zabezpečení přenosu točivého momentu na pohon.</p>	<p>Spojuje hřídel rotoru trakčního motoru s pastorkovou hřídelí převodovky. Vstupní spojka je na straně motoru opatřena izolací, která zabraňuje průchodu ložiskových proudů směrem do převodovky, a prokluzovým pouzdrem na straně převodovky, aby se zabránilo poškození ozubení způsobenému zkratovými momenty.</p>
		<p>Spojuje vstupní spojku s trakčním motorem a výstupní spojku s nápravou.</p>
		<p>Přenáší točivý moment na dvojkolí. Spojuje MGU s nápravou a vyrovnává relativní pohyby mezi převodovkou a dvojkolím.</p>
		<p>Snižuje teplotu trakčního motoru pomocí ventilace vzduchem</p>
		<p>Uchycení MGU v podvozku</p>

#### 4.2.4 Krok 4. Analýza selhání

Navazujícím krokem je analýza selhání. Pro realizaci byl vytvořen řetězec selhání (viz tabulka 19). Na základě analýzy struktury byly pro každý prvek systému definovány všechny vady, což je ústřední bod analýzy selhání. Následně byly stanoveny příčiny zjištěných vad a jejich možné následky (místní a konečné) pro provoz vozidla – provozu tramvajové jednotky.

Trakční jednotka MGU se považuje za celek a vyhodnocuje se hlavně z hlediska kritičnosti na provoz tramvaje (analýza FMECA). Je-li v případě poruchy předpokladem poškození jednoho elektrického motoru, může to mít kritický dopad na provoz, pokud tramvaj obsahuje jen dva motory. Pokud se jedná o tramvaje obsahující čtyři trakční motory, porucha není kritická, protože v případě poruchy jednoho motoru není ohrožena provozuschopnost vozidla. S ohledem na zadání ovšem je prezentovaná analýza prováděna na nižší úrovni rozlišení.

Po definování následků a příčin případných poruch byl stanoven parametr S (závažnost poruchy), na něhož je kladen důraz v harmonizované FMEA analýze. Hodnocení parametru S není subjektivním procesem. Jsou určena kritéria, podle kterých se parametr snadno zvolí (viz tabulka 9). Vyhodnocoval se hlavně dopad na hlavní a vedlejší funkci prvků a další parametry jako hluk, vibrace, vzhled atd. Správné zvolení parametru S je důležité, protože je to základem pro stanovení priority nasazení opatření k detekci či prevenci (parametr AP). Vyhodnocení parametru S je částí analýzy selhání kvůli tomu že závažnost musí být stanovena bez ohledu na výskyt O a na detekovatelnost D, které budou stanoveny až v dalším kroku DFMEA.

Závažnost poruch statoru, rotoru a systému chlazení motoru byla hodnocená stejným číslem z důvodu, že porucha ventilátoru způsobí zahřívání motoru, což může mít kritický dopad na celou trakční jednotku. Čidla a další pomocné elementy konstrukce jsou hodnoceny menším číslem z důvodu plnění jen vedlejších funkcí, které nemají dopad na funkčnost motoru samotného.

Příklad výsledků 4. kroku analýzy je uveden v tabulce 19. Kompletní pohled poskytuje dokumentace v excelovském souboru v příloze č. 1.

Tabulka 19 Analýza selhání

Následek	Úroveň závažnosti S	Vada	Příčina
Poškození trakčního motoru. Ztráta přeměny elektrické energie. Ztráta rotačního pohybu hřídele a přenosu krouticího momentu, ztráta krouticího momentu z trakčního motoru na brzdění dvojkolí	8	Mechanická porucha vinutí statoru	Nízký izolační odpor vinutí statoru, závitový zkrat, přetížení vinutí nebo průraz statorové cívky
Ztráta přeměny elektrické energie. Ztráta rotačního	6	Mechanická porucha elektrického připojení	Průraz kabelu, nízký izolační odpor izolace

pohybu hřídele a přenosu kroučícího momentu			kabelu, chyba operátora montáže
Rozlomení svaru, nevyhovující únosnost, porezita, trhliny, nekvalitní spoj	3	Mechanická porucha svařované kostry	Nedodržování postupů a norem při procesu svařování, chyba operátora při skladování, přenosu nebo zapojení
Poškození trakčního motoru. Ztráta přeměny elektrické energie. Ztráta rotačního pohybu hřídele a přenosu kroučícího momentu, ztráta kroučícího momentu z trakčního motoru na brždění dvojkolí	8	Zkrat mezi fázemi	Nečistoty uvnitř elektromotoru, otěr, vibrace, zablokování rotoru nebo přepětí
Zkrat vinutí se zemí. Ztráta přeměny elektrické energie. Ztráta rotačního pohybu hřídele a přenosu kroučícího momentu, ztráta kroučícího momentu z trakčního motoru na brždění dvojkolí	8	Vinutí uzemněné do kostry	Nečistoty uvnitř elektromotoru, otěr, vibrace, zablokování rotoru nebo přepětí
Poškození trakčního motoru. Ztráta přeměny elektrické energie. Ztráta rotačního pohybu hřídele a přenosu kroučícího momentu, ztráta kroučícího momentu z trakčního motoru na brždění dvojkolí	8	Přerušení jedné fáze	Spálená pojistka, přerušený stykač, přerušené elektrické vedení nebo špatný spoj
Průraz izolace kabeláže se zemí, zkrat mezi fázemi	7	Mechanická porucha izolace	Nízký izolační odpor použité izolace, odlišné fázové napětí kvůli nesymetrickému zatížení
Ztráta přeměny elektrické energie. Ztráta rotačního pohybu hřídele a přenosu kroučícího momentu	8	Mechanická porucha hřídele rotoru	Poškození hřídele při výrobě, přemístění, instalace nebo skladování, koroze, tepelné namáhání
Ztráta kroučícího momentu z trakčního motoru na pohon dvojkolí, nadměrné oteplení povrchu	8	Mechanická porucha klece rotoru	Poškození měděné klece nakrátko během výroby nebo zapojení, koroze, tepelné namáhání



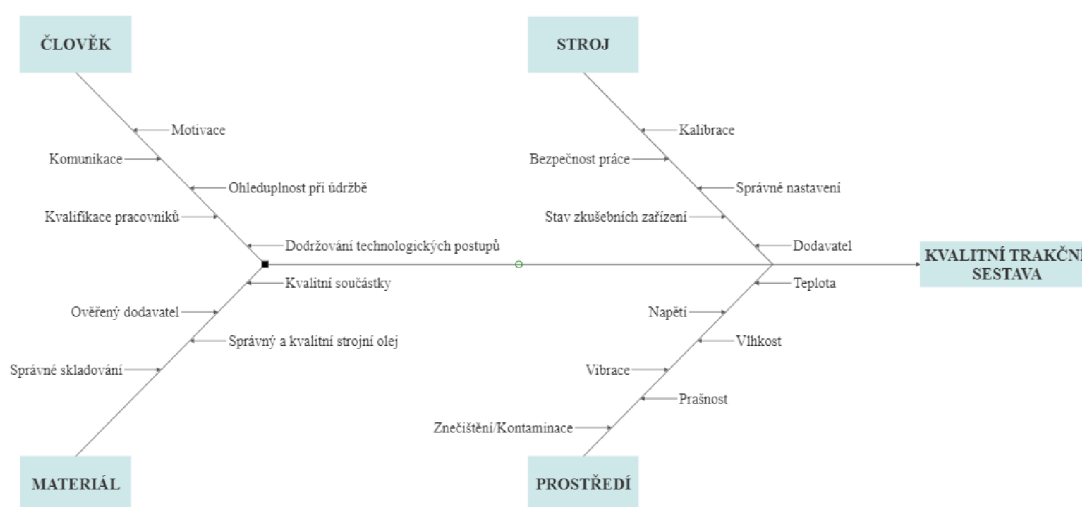
Ztráta přeměny elektrické energie. Ztráta rotačního pohybu hřídele a přenosu krouticího momentu	8	Mechanická porucha předního štítu (prasklina / lom)	Nadměrné napětí, únava materiálu předního štítu, koroze. Průchod nadměrného proudu, tepelné namáhání
Ztráta přeměny elektrické energie. Ztráta rotačního pohybu hřídele a přenosu krouticího momentu	7	Fyzický kontakt se státorem elektromotoru	Přetížení ložisek motoru, nevyváženost rotoru
Ztráta přeměny elektrické energie. Ztráta rotačního pohybu hřídele a přenosu krouticího momentu	7	Zablokování rotoru uvnitř statoru	Porucha ložisek, přetížení elektromotoru, motor nemá správné napětí
Nemá žádný vliv v případě nepoškození konektorů a elektrického vedení	3	Jiskření rotoru elektromotoru	Vibrování rotoru v důsledku velkých proudů při jeho náběhu, přetížení zdroje, nerovnoměrné rozdělení proudů, znečištěný povrch
Ztráta rotačního pohybu hřídele a přenosu krouticího momentu, ztráta krouticího momentu z trakčního motoru na pohon a brzdění dvojkolí	6	Mechanické poškození předního/zadního ložiska	Poškození uložení rotoru v ložiskách, zadření, nebo kolaps předního / zadního ložiska, koroze, nesprávná manipulace a mazání, znečištění, příčné zatížení, nevyváženost ventilátoru, tepelné namáhání, nesprávná údržba
Ztráta kontroly snímače otáček, ztráta indikace otáček trakčního motoru	4	Porucha ozubeného věnce pro snímač otáček	Nadměrné napětí, únava materiálu ozubeného věnce, zanesení prostoru čidla nečistotami
Ztráta nebo nesprávná indikace otáček trakčního motoru	5	Žádný, nebo falešný signál	Elektricky zkratovaný snímač, nebo elektrické rozpojení snímače
Ztráta nebo nesprávná indikace teploty trakčního motoru (statoru)	5	Žádný, nebo falešný signál	Elektricky zkratovaný snímač, nebo elektrické rozpojení snímače
Rozlomení svaru, nevyhovující únosnost,	3	Mechanická porucha svařované kostry	Nedodržování postupů a norem při procesu svařování, chyba operátora

porezita, trhliny, nekvalitní spoj			při skladování, přenosu nebo zapojení, koroze
Případné poškození čidel, narušení vlastností maziva, ale ve většině případů nemá vliv na funkčnost kvůli uzemnění celé sestavy	<b>4</b>	Průchod ložiskového proudu spojkou	Porucha izolace na straně motoru
Rozlomení svaru, nevyhovující únosnost, porezita, trhliny, nekvalitní spoj	<b>3</b>	Mechanická porucha svařované kostry	Nedodržování postupů a norem při procesu svařování, chyba operátora při skladování, přenosu nebo zapojení, koroze
Nesplnění požadavků na hluk, příliš hlučná práce systému	<b>4</b>	Hluk v převodovce	Porucha ložisek, přetížení elektromotoru, opotřebení ozubení
Zvýšená spotřeba oleje, destrukce a zablokování hřídele a pístů motoru	<b>4</b>	Únik oleje	Mechanická porucha svařované kostry, opotřebení materiálu, špatná těsnost konstrukce
Rozlomení svaru, nevyhovující únosnost, porezita, trhliny, nekvalitní spoj	<b>3</b>	Mechanická porucha svařované kostry	Nedodržování postupů a norem při procesu svařování, chyba operátora při skladování, přenosu nebo zapojení, koroze
Ztráta rotačního pohybu a přenosu kroutícího momentu	<b>7</b>	Prokluzující výstupní spojka	Opotřebení materiálu, nesprávná montáž spojky
Vzduch proudí nesprávným směrem. Hrozí znečištění ventilátoru	<b>6</b>	Otáčení opačným směrem	Opačné zapojení polarity
Přehřátí trakčního motoru	<b>8</b>	Ventilátor se neroztočí	Není správné napětí, nečistoty, mechanická porucha vinutí, přetížení elektrického obvodu, nevyváženost ventilátoru
Přehřátí trakčního motoru	<b>8</b>	Mechanická porucha ventilátoru	Neúčinný vzduchový filtr, chyba montáže, přenosu, skladování

Nespolehlivé chlazení elektromotoru	7	Ventilátor se spouští pouze v některých rychlostech	Jeden nebo více výkonových odporů ventilátoru je nefunkční
Nespolehlivé chlazení elektromotoru	7	Ventilátor běží pomalu nebo samovolně mění rychlost	Vadné uhlíkové kartáče
Nesplnění požadavků na hluk, příliš hlučná práce systému	4	Hlučnost ventilátoru	Nevyváženost, chyba při skladování a montáži, mechanická závada, opotřebení uhlíkových kartáčů
Málo přesné řízení a dále směrová nestabilita vozidla, snížení tlumení vibrace	4	Mechanická porucha silentbloků	Únava materiálu, opotřebení silentbloků

Pomocí výše uvedeného řetězce selhání lze pro přehlednost vytvořit diagram příčin a následků pro trakční sestavu MGU. Mezi typické faktory, které ovlivňují kvalitu konečného produktu, náleží jak klasické faktory 4M: člověk (**man**), provádějící činnosti, stroje (**machine**), používaný materiál (**material**) a pracovní prostředí (**milieu**) tak podmínky exploatace trakční sestavy. Podrobný rozbor příčin lze vidět na obrázku 17.

Pro další krok analýzy nejdůležitějším parametrem jsou příčiny případných vad či selhání, které je potřeba určit správně a jednoznačně, aby bylo možné stanovit preventivní opatření k příčinám a jejich detekci. Cílem předcházející tabulky bylo stanovení všech možných příčin, což usnadní proces optimalizace a přispěje k rozšíření DFMEA analýzy.



Obrázek 17 Ishikawův diagram pro analýzu selhání trakční sestavy.

Výsledky čtvrtého kroku DMEA přímo souvisí se případnou studií PFMEA trakční soustavy. Následky vad se mohou opakovat v obou typech analýzy FMEA, pokud se jedná o neschopnost procesu dosáhnout ve výrobě vlastnosti produktu tak, jak byly navrženy. Žádný následek vady by neměl být vyloučen z FMEA analýzy. Ty následky, které nebyly zdokumentovány v rámci DFMEA analýzy by měly být identifikovány a vyhodnoceny v rámci PFMEA analýzy.

#### **4.2.5 Krok 5. Analýza rizik**

Dalším krokem DFMEA je analýza rizik, která se vztahuje hlavně k příčinám poruch stanovených v předchozím kroku. Na této etapě byly definovány stávající preventivní opatření k příčinám samotným a opatření k odhalení těchto příčin.

Centrálním bodem pátého kroku DMEA analýzy je stanovení parametru AP, podle kterého se určuje prioritizace nasazení nápravných opatření během optimalizace. Tento parametr závisí na kombinaci parametrů S, O, D a určuje se podle tabulky 6. Parametr AP je rozhodující pro krok 6 DFMEA analýzy.

Analýza rizik se realizovala postupně, jak zachycuje tabulka 20. Na začátku byla stanovena stávající preventivní opatření k příčině a vyhodnocen parametr O (výskyt) se zohledněním těchto opatření. Parametr O byl určen podle kritérií definovaných v tabulce 10, ale byl upraven pro potřeby praxe. Následně byla vyhodnocena opatření k odhalení vady nebo příčiny a zvolen parametr D (detekovatelnost) podle tabulky 11. Parametr D byl pro potřeby praxe upraven. Na základě kombinací výše uvedených parametrů byla určena prioritizace opatření (AP), což usnadní proces optimalizace při nasazení nových preventivních opatření a opatření k detekci.

Výsledky daného kroku lze považovat za adekvátní. Nejvyšší hodnoty parametru AP vychází pro rotor trakčního motoru pravděpodobně kvůli vyššímu namáhání během zkoušek na přetáčky a během provozu. Vysoké hodnoty vychází i pro citlivé součástky sestavy jako jsou senzory a chladičový systém. Všechno, co se týká konstrukce trakční sestavy má vzhledem k zadání nižší prioritizaci. Podle tabulky 20 je ve výsledku zřejmé, že vyšší hodnotu AP mají hlavně prvky sestavy, na které má vliv lidský faktor. Podle výsledků pátého kroku DFMEA lze vyslovit, že nová harmonizovaná verze FMEA je efektivnější než předcházející verze. Pokud se parametry S, O, D stanovují s dostatečnou pozorností a zvažují se všechny parametry uvedené v příručce harmonizované FMEA, pak postup nasazení opatření vychází dle očekávání..

Priority nasazení opatření:

- 1) Prvky, ovlivněné lidským faktorem
- 2) Ventilační a chladičový systém
- 3) Senzory a další citlivé prvky
- 4) Pohyblivé části sestavy
- 5) Stator a další konstrukční elementy sestavy

Tabulka 20 Analýza rizik

<b>Stávající preventivní opatření k příčině</b>	<b>Výskyt</b>	<b>Stávající preventivní opatření k odhalení vady nebo příčiny</b>	<b>Detekce</b>	<b>AP</b>
Výběr spolehlivého ověřeného dodavatele elektrických komponent, použití kvalitních materiálů, správná údržba elektrického motoru	<b>3</b>	Zkoušky izolačního odporu trakčního motoru, proběhu motoru, teplotní zkoušky, vytvoření charakteristik (naprázdno, nakrátko, pod zátěží), napěťová zkouška	<b>3</b>	<b>L</b>
Zaměstnání kvalifikovaných mechaniků, výběr spolehlivého dodavatele materiálů, správná údržba a skladování kabeláže	<b>7</b>	Napěťová zkouška kabeláže na průraz v případě přepětí a napěťového skoku	<b>6</b>	<b>M</b>
Dodržování postupu a norem při procesu svařování, skladování a údržby, online školení zaměstnanců	<b>2</b>	Ověření vzhledu výrobku, RTG kontrola, teplotní zkoušky a následné zkoumání pomocí elektronového mikroskopu	<b>5</b>	<b>L</b>
Správná údržba elektrického motoru, správné skladování, výběr spolehlivého dodavatele materiálů	<b>3</b>	Napěťové zkoušky trakčního motoru, jeho proběhu, teplotní zkoušky, vytvoření charakteristik (naprázdno, nakrátko, pod zátěží), zkouška na přetáčky	<b>3</b>	<b>L</b>
Správná údržba elektrického motoru, správné skladování, výběr spolehlivého dodavatele materiálů	<b>3</b>	Napěťové zkoušky trakčního motoru, jeho proběhu, teplotní zkoušky, vytvoření charakteristik (naprázdno, nakrátko, pod zátěží), zkouška na přetáčky	<b>3</b>	<b>L</b>
Správná údržba elektrického motoru, správné skladování, výběr spolehlivého dodavatele materiálů	<b>3</b>	Napěťové zkoušky trakčního motoru, jeho proběhu, teplotní zkoušky, vytvoření charakteristik (naprázdno, nakrátko, pod zátěží), zkouška na přetáčky	<b>3</b>	<b>L</b>
Výběr spolehlivého ověřeného dodavatele, použití kvalitních materiálů, správná údržba	<b>5</b>	Napěťové zkoušky kabeláže na přepětí a skokovou změnu napětí, dlouhodobé zatěžování kabelů	<b>6</b>	<b>M</b>

elektrického motoru, použití ochranných součástí				
Výběr spolehlivého ověřeného dodavatele, použití kvalitních materiálů, preventivní kontrola výrobků, zaškolení operátorů	<b>4</b>	Ověření vzhledu výrobku, RTG kontrola, teplotní zkoušky a následné zkoumání pomocí elektronového mikroskopu	<b>5</b>	<b>L</b>
Dodržování postupu a norem při zapojení, skladování a údržbě, školení zaměstnanců	<b>4</b>	Ověření vzhledu výrobku, RTG kontrola, teplotní zkoušky a následné zkoumání pomocí elektronového mikroskopu	<b>5</b>	<b>M</b>
Dodržování postupu a norem při zapojení, skladování a údržbě	<b>3</b>	Ověření vzhledu výrobku, RTG kontrola, teplotní zkoušky a následné zkoumání pomocí elektronového mikroskopu	<b>5</b>	<b>M</b>
Dodržování postupu a norem při zapojení, skladování a údržbě	<b>5</b>	Napětíové zkoušky trakčního motoru, jeho proběhu, teplotní zkoušky, vytvoření charakteristik (naprázdno, nakrátko, pod zátěží), zkouška na přetáčky	<b>3</b>	<b>M</b>
Dodržování postupu a norem při zapojení, skladování a údržbě	<b>5</b>	Napětíové zkoušky trakčního motoru, jeho proběhu, teplotní zkoušky, vytvoření charakteristik (naprázdno, nakrátko, pod zátěží), zkouška na přetáčky	<b>3</b>	<b>M</b>
Předcházení přetížení elektrického motoru, správná údržba, dodržování postupů při zkouškách	<b>4</b>	Zkoušky elektrického motoru na přetáčky, vibraci, zkoušky proběhu, napětíové zkoušky	<b>5</b>	<b>L</b>
Dodržování postupu a norem při zapojení, skladování a údržbě, preventivní kontrola	<b>6</b>	Kontrola geometrie, zkoušky proběhu a na přetáčky, školení pracovníků, teplotní zkoušky, ověření vzhledu výrobku	<b>6</b>	<b>M</b>
Dodržování postupu a norem při zapojení, skladování a údržbě	<b>4</b>	Napětíové zkoušky čidel na skokovou změnu a dlouhodobé zatížení	<b>6</b>	<b>L</b>

Dodržování postupu a norem při zapojení, skladování a údržbě, školení zaměstnanců	<b>7</b>	Napětové zkoušky čidla otáček	<b>6</b>	<b>M</b>
Dodržování postupu a norem při zapojení, skladování a údržbě, školení zaměstnanců	<b>7</b>	Napětové zkoušky čidla teploty	<b>6</b>	<b>M</b>
Dodržování postupu a norem při procesu svařování, skladování a údržby, online školení zaměstnanců	<b>2</b>	Ověření vzhledu výrobku, RTG kontrola, teplotní zkoušky a následné zkoumání pomocí elektronového mikroskopu	<b>5</b>	<b>L</b>
Školení zaměstnanců, používání kvalitních materiálů, dodržování postupů při spojování	<b>3</b>	Napětové zkoušky, měření izolačního odporu	<b>5</b>	<b>L</b>
Dodržování postupu a norem při procesu svařování, skladování a údržby, online školení zaměstnanců	<b>2</b>	Ověření vzhledu výrobku, RTG kontrola, teplotní zkoušky a následné zkoumání pomocí elektronového mikroskopu	<b>5</b>	<b>L</b>
Dodržování postupu a norem při zapojení, skladování a údržbě	<b>5</b>	Napětové zkoušky trakčního motoru, jeho proběhu, teplotní zkoušky, vytvoření charakteristik (naprázdno, nakrátko, pod zátěží), zkouška na přetáčky	<b>3</b>	<b>L</b>
Dodržování postupu a norem při procesu svařování, skladování a údržby, online školení zaměstnanců	<b>4</b>	Ověření vzhledu výrobku, RTG kontrola, teplotní zkoušky a následné zkoumání pomocí elektronového mikroskopu	<b>5</b>	<b>L</b>
Dodržování postupu a norem při procesu svařování, skladování a údržby, online školení zaměstnanců	<b>2</b>	Ověření vzhledu výrobku, RTG kontrola, teplotní zkoušky a následné zkoumání pomocí elektronového mikroskopu	<b>5</b>	<b>L</b>
Dodržování postupu a norem při montáži, skladování a údržbě, předcházení přetížení při zkouškách	<b>5</b>	Zkoušky elektrického motoru na přetáčky, vibraci, zkoušky proběhu, pravidelná kontrola	<b>7</b>	<b>H</b>

Monitorování práce zaměstnanců, pravidelné školení	<b>6</b>	Napět'ová zkouška, ověření správnosti zapojení komponent, zvonění kabelů	<b>6</b>	<b>M</b>
Dodržování postupu a norem při montáži, skladování a údržbě, předcházet přetížení při zkouškách	<b>7</b>	Napět'ové zkoušky trakčního motoru, jeho proběhu, teplotní zkoušky, vytvoření charakteristik (naprázdno, nakrátko, pod zátěží), zkouška na přetotáčky	<b>4</b>	<b>H</b>
Dodržování postupu a norem při montáži, skladování a údržbě, předcházet přetížení při zkouškách	<b>5</b>	Preventivní kontrola vzduchových filtrů, školení zaměstnanců, zkoušky proběhu a přetotáčky	<b>4</b>	<b>M</b>
Výběr spolehlivého ověřeného dodavatele, použití kvalitních materiálu, správná údržba elektrického motoru	<b>6</b>	Napět'ové zkoušky trakčního motoru, jeho proběhu, teplotní zkoušky, vytvoření charakteristik (naprázdno, nakrátko, pod zátěží), zkouška na přetotáčky	<b>5</b>	<b>H</b>
Výběr spolehlivého ověřeného dodavatele, použití kvalitních materiálu, správná údržba elektrického motoru	<b>5</b>	Napět'ové zkoušky trakčního motoru, jeho proběhu, teplotní zkoušky, vytvoření charakteristik (naprázdno, nakrátko, pod zátěží), zkouška na přetotáčky	<b>7</b>	<b>H</b>
Výběr spolehlivého ověřeného dodavatele, použití kvalitních materiálu, správná údržba elektrického motoru	<b>4</b>	Napět'ové zkoušky trakčního motoru, jeho proběhu, teplotní zkoušky, vytvoření charakteristik (naprázdno, nakrátko, pod zátěží), zkouška na přetotáčky	<b>6</b>	<b>L</b>
Dodržování postupu a norem při montáži, skladování a údržbě, předcházet přetížení při zkouškách	<b>5</b>	Předcházení přetížení při zkouškách trakčního motoru, napět'ové zkoušky trakčního motoru, jeho proběhu, teplotní zkoušky, vytvoření charakteristik (naprázdno, nakrátko, pod zátěží)	<b>6</b>	<b>L</b>



#### 4.2.6 Krok 6. Optimalizace

Optimalizace je posledním a nejdůležitějším krokem před zdokumentováním výsledků a vyhodnocením přijatých řešení. V tomto kroku byla stanovena nutná nápravní opatření pro snížení rizik definovaných v předchozím kroku a taky opatření, která jsou určena jen pro zlepšení produktu, případně procesů s ním souvisejících (viz tabulka 21). Tabulka opět uvádí výšeč realizované FMEA, kompletní tabulka je v příloze č. 1.

Optimalizace byla zaměřena na selhání se střední nebo vysokou prioritou určenou parametrem AP. Seznam navržených opatření lze vidět v tabulce 21. Podle výsledků z předchozího kroku analýzy lze říct, že parametr AP je efektivní pro určení postupu nasazení opatření. Bylo potřeba vyřešit problémy způsobené citlivými součástkami, doladit chladicí systém a zajistit chránění motoru bez ohledu na jeho stav. Většinu problémů je možné vyřešit pravidelným servisem a důkladní kontrolou během zkoušení a provozu sestavy. Je potřeba pravidelně čistit a kalibrovat čidla a průběžně je elektricky kontrolovat pomocí sledování signálů na IO modulech. Záleží taky na dodavateli komponent. Je lepší vybírat spolehlivého a ověřeného dodavatele pro dlouhodobou spolupráci i v budoucnu. Pro chránění motoru je možné použít aretaci rotoru, kterou před zahájením provozu bude potřeba demontovat. Pokud aretace je problematická, je potřeba najít jiné řešení.

Dalším cílem optimalizace DFMEA bylo omezit počet neúmyslných chyb lidí. Určitě by se dalo aplikovat princip Poka Yoke (štítkování napěťových uzlů a svorek nebo barevné označení, protože signálové vodiče jsou vždy stejné barvy, což způsobuje velké množství neúmyslných chyb). Dalším důležitým opatřením by mohlo být pravidelné školení zaměstnanců a ověření těchto znalostí a průběžná kontrola od nadřízených kolegů.

Podrobný seznam všech zavedených opatření a taky opatření ve stavu rozhodování a realizace je uveden v tabulce 21. Pokud bylo rozhodnuto, že žádné opatření není potřebné, bylo to uvedeno v poznámkách.

**Tabulka 21 Optimalizace DFMEA**

Preventivní opatření	Opatření k odhalení	Status	✓/ ✗	S	O	D	AP	Poznámky
								Není potřebné žádné další opatření
Pravidelné zaškolení operátorů a ověření jejich pracovních schopností, kurzy montáže, preventivní kontrola znalostí potenciálních pracovníků	Preventivní kontrola kabeláže, dokumentace o zkouškách od dodavatele, další vlastní napěťové zkoušky kabelů, pravidelná	V realizaci	✗	6	5	5	L	Nízká priorita opatření

	kontrola znalosti pracovníků a ověření jejich kvalifikace									
										Není potřebné žádné další opatření
										Není potřebné žádné další opatření
										Není potřebné žádné další opatření
										Není potřebné žádné další opatření
Pravidelné zaškolení operátorů a ověření jejich pracovních schopností, kurzy montáže, preventivní kontrola znalosti potenciálních pracovníků, rozšíření seznamu dodavatelů kabeláže	Preventivní kontrola kabeláže, dokumentace o zkouškách od dodavatele, další vlastní napěťové zkoušky kabelů	V realizaci	✘	7	3	3	L			Nízká priorita opatření
Chránění motoru bez ohledu na to, v jakém stavu je (samostatný, smontovaný s převodovkou, namontován v podvozku, namontován do vozidla, atd.), k ochraně motoru (ložiska) lze použít <b>aretaci</b> rotoru, za níž odpovídá výrobce nebo dodavatel motoru, je potřeba zajistit	Preventivní kontrola motoru na správnost aretace pohyblivých částí, zaškolení mechaniků, jak se správně dělá aretace a její demontáž, doplňující kontrola rotoru	Uzavřeno	✓	8	3	4	L			Nízká priorita opatření

otáčení rotoru podle postupu uvedeného v udržovacím manuálu motoru.	před spuštěním motoru							
Chránění motoru bez ohledu na to, v jakém stavu je (samostatný, smontovaný s převodovkou, namontován v podvozku, namontován do vozidla atd.), k ochraně motoru (ložiska) lze použít <b>aretaci</b> rotoru, za níž odpovídá výrobce nebo dodavatel motoru, je potřeba zajistit otáčení rotoru podle postupu uvedeného v udržovacím manuálu motoru.	Preventivní kontrola motoru na správnost aretace pohyblivých částí, zaškolení mechaniků, jak se správně dělá aretace a její demontáž, doplňující kontrola rotoru před spuštěním motoru	Uzavřeno	✓	8	3	4	L	Nízká priorita opatření
Chránění motoru bez ohledu na to, v jakém stavu je (samostatný, smontovaný s převodovkou, namontován v podvozku, namontován do vozidla atd.), k ochraně motoru (ložiska) lze použít <b>aretaci</b> rotoru, za níž odpovídá výrobce nebo dodavatel motoru, je potřeba zajistit otáčení rotoru podle postupu uvedeného v udržovacím manuálu motoru.	Preventivní kontrola motoru na správnost aretace pohyblivých částí, zaškolení mechaniků, jak se správně dělá aretace a její demontáž, doplňující kontrola rotoru před spuštěním motoru	Uzavřeno	✓	8	3	4	L	Nízká priorita opatření
Chránění motoru bez ohledu na to, v jakém stavu je (samostatný, smontovaný s	Preventivní kontrola motoru na správnost aretace	Uzavřeno	✓	7	3	3	L	Nízká priorita opatření

<p>převodovkou, namontován v podvozku, namontován do vozidla atd.), k ochraně motoru (ložiska) lze použít <b>aretaci</b> rotoru, za níž odpovídá výrobce nebo dodavatel motoru, je potřeba zajistit otáčení rotoru podle postupu uvedeného v udržovacím manuálu motoru.</p>	<p>pohyblivých částí, zaškolení mechaniků, jak se správně dělá aretace a její demontáž, doplňující kontrola rotoru před spuštěním motoru</p>							
<p>Chránění motoru bez ohledu na to, v jakém stavu je (samostatný, smontovaný s převodovkou, namontován v podvozku, namontován do vozidla atd.), k ochraně motoru (ložiska) lze použít <b>aretaci</b> rotoru, za níž odpovídá výrobce nebo dodavatel motoru, je potřeba zajistit otáčení rotoru podle postupu uvedeného v udržovacím manuálu motoru.</p>	<p>Preventivní kontrola motoru na správnost aretace pohyblivých částí, zaškolení mechaniků, jak se správně dělá aretace a její demontáž, doplňující kontrola rotoru před spuštěním motoru</p>	<p>Uzavřeno</p>	<p>✓</p>	<p>7</p>	<p>3</p>	<p>3</p>	<p>L</p>	<p>Nízká priorita opatření</p>
								<p>Není potřebné žádné další opatření</p>
<p>Chránění motoru bez ohledu na to, v jakém stavu je (samostatný, smontovaný s převodovkou, namontován v podvozku, namontován do vozidla atd.), k ochraně</p>	<p>Preventivní kontrola motoru na správnost aretace pohyblivých částí, zaškolení mechaniků, jak se správně dělá</p>	<p>Uzavřeno</p>	<p>✓</p>	<p>6</p>	<p>4</p>	<p>5</p>	<p>L</p>	<p>Nízká priorita opatření</p>

motoru (ložiska) lze použít aretaci rotoru, za níž odpovídá výrobce nebo dodavatel motoru, je potřeba zajistit otáčení rotoru podle postupu uvedeného v udržovacím manuálu motoru.	aretace a její demontáž, doplňující kontrola rotoru před spuštěním motoru							
								Není potřebné žádné další opatření
Pravidelné čištění a kalibrace čidel, pravidelný servis jednotek nejlépe na konci každého dne, diagnostika, použití paralelních matematických redundantních modelů	Preventivní kontrola a zkoušky čidla, požádání dodavatele o testování čidla a zdokumentování výsledků, kontrola signálů na IO modulech během provozu, předvídaní životnosti čidla na základě hodnot impedance a průběhu kalibrační křivky	V rozhodování	×	5	5	5	L	Nízká priorita opatření
Pravidelné čištění a kalibrace čidel, pravidelný servis jednotek nejlépe na konci každého dne, diagnostika, použití paralelních matematických redundantních modelů	Preventivní kontrola a zkoušky čidla, požádání dodavatele o testování čidla a zdokumentování výsledků, kontrola signálů na IO modulech během provozu,	V rozhodování	×	5	5	5	L	Nízká priorita opatření

	předvídaní životnosti čidla na základě hodnot impedance a průběhu kalibrační křivky								
									Není potřebné žádné další opatření
									Není potřebné žádné další opatření
									Není potřebné žádné další opatření
									Není potřebné žádné další opatření
Správná údržba podle postupu uvedenému v udržovacím manuálu motoru, pravidelná výměna těsnících prvků, zabránění přehřívání motoru a zvýšení tlaku v systému, výběr maziva s menší viskozitou, pravidelná výměna oleje	Preventivní kontrola těsnosti konstrukce, kontrola hladiny oleje ve všech přístrojích jednotky, kontrola geometrie převodovky, kontrola tlaku v systému, kontrola utažení šroubů	Uzavřeno	✓	4	3	3	L		Nízká priorita opatření
									Není potřebné žádné další opatření

Údržba podle postupu uvedenému v udržovacím manuálu motoru, správná technika jízdy, pravidelná výměna opotřebené spojky, pravidelné testování spojky na vysokých otáčkách motoru	Preventivní kontrola geometrie spojky, kontrola utažení šroubu, doplňující kontrola montáže spojky, kontrola teploty při údržbě, kontrola oleje, testování spojky při vysokých otáčkách motoru	V rozhodování	×	7	5	5	M	Střední prioritá opatření
Doplňující online školení zaměstnanců, štítkování kabelů s označením čísla uzlů, barevně odlišné kabely a svorky	Pravidelné ověření znalostí zaměstnanců, další kontrola zapojení podle principiálního schématu při napěťových zkouškách	Uzavřeno	✓	6	4	5	L	Nízká prioritá opatření
Doplňující online školení zaměstnanců, štítkování kabelů s označením čísla uzlů, barevně odlišné kabely a svorky, zavedení principu Poka Yoke do výrobního procesu, pravidelné čištění nebo případná výměna ventilátoru	Pravidelné ověření znalostí zaměstnanců, další kontrola zapojení podle principiálního schématu při napěťových zkouškách, kontrola směru výfuku vzduchu	V realizaci	×	8	5	3	M	Střední prioritá opatření
Výměna vzduchových filtrů, doplňující online školení zaměstnanců, štítkování kabelů s označením čísla uzlů, barevně odlišné kabely a svorky, zavedení principu Poka Yoke do	Pravidelné ověření znalostí zaměstnanců, další kontrola zapojení podle principiálního schématu při napěťových	V realizaci	×	8	3	3	L	Nízká prioritá opatření

výrobního procesu, pravidelné čištění nebo případná výměna ventilátoru	zkouškách, kontrola směru výfuku vzduchu, pravidelná kontrola vzduchových filtrů							
Správná údržba podle postupu uvedenému v udržovacím manuálu motoru, pravidelné čištění ventilátoru a jejich případná výměna, hledání alternativního dodavatele dílů	Kontrola zapojení podle principiálních schémat při napěťových zkouškách, kontrola směru výfuku vzduchu, kontrola signálu na IO modulech během provozu, kontrola teploty motoru při různých rychlostech	V realizaci	✘	7	4	4	M	Střední prioritá opatření
Správná údržba podle postupu uvedenému v udržovacím manuálu motoru, pravidelné čištění ventilátoru a jejich případná výměna, hledání alternativního dodavatele dílů	Kontrola zapojení podle principiálních schémat při napěťových zkouškách, kontrola směru výfuku vzduchu, kontrola signálu na IO modulech během provozu, kontrola teploty motoru při různých rychlostech, dokumentace o zkouškách od dodavatele	V realizaci	✘	7	4	5	M	Střední prioritá opatření
								Není potřebné



	žádné další opatření
	Není potřebné žádné další opatření

## 5. ZÁVĚR

Zadání diplomové práce říkalo: „Nastudovat stroje a metody plánování kvality produktů, resp. procesů zaměřené na rozbor technických rizik. Pozornost zaměřte zejména na metodu FMEA, včetně přechodu na harmonizovanou metodiku VDA/AIAG. Prostudujte články, bakalářské a diplomové práce, zabývající se metodou FMEA. Popište dílčí kroky analýzy, včetně analýzy struktury systému, analýzy struktury funkcí, možných poruch, samotnou analýzu rizik a optimalizaci. Seznamte se s dostupnými nástroji SW podpory realizace a dokumentace této analýzy technických rizik s cílem popsat možnosti, které existují. Aplikaci FMEA analýzy doložte zpracovanou případovou studií, která analyticky i metodicky doloží přístup k rozboru a zmírnění technických rizik.“

V první kapitole diplomové práce jsou popsány nástroje a metody plánování kvality. Důraz byl kladen na pokročilé metody plánování kvality produktu APQP, popis každé fáze daného postupu a významné nástroje, které se v jednotlivých fázích používají.

Druhá kapitola diplomové práce se zabývá metodou FMEA, a hlavně konceptem přechodu na její novou harmonizovanou verzi podle příručky AIAG/VDA. Je detailně popsán 7-krokový přístup včetně nových parametrů a metod, které se v každém kroku používají. Podle zadání bylo zapotřebí nastudovat bakalářské a diplomové práce zabývající se harmonizovanou FMEA. V realitě se podařilo sehnat jenom jedinou absolventskou práci teoretické povahy, zabývající se harmonizovanou FMEA metodou, proto se informace čerpala hlavně z oficiální příručky FMEA [15] a odborných článků.

V třetí kapitole jsou uvedena možná softwarová řešení, která byla přezkoumána před zpracováním praktické části diplomové práce. Všechny zmíněné programy byly nainstalovány a vyzkoušeny, čímž bylo zjištěno, že požadavky splňuje jenom program od firmy Relyence. V praxi se ale stále používají excelové tabulky i když nejsou dostatečně přehledné. Během zpracování diplomové práce bylo provedeno několik pokusů vytváření FMEA formulářů pomocí programů uvedených ve třetí kapitole ale bylo zjištěno, že demo verze dovoluje použít jen polovinu nabízených nástrojů, proto DFMEA analýza byla zpracována ve tvaru excelové tabulky (viz příloha č. 1)

Čtvrtá kapitola diplomové práce je věnována její praktické části. Jedná se o konstrukční DFMEA analýzu, objektem zkoumání které byla zvolena trakční jednotka MGU, která se používá hlavně v nízkopodlažní tramvaji. DFMEA analýza byla zpracována při spolupráci s RAM/LCC specialisty firmy Škoda Transportation.

Na začátku kapitoly je uveden podrobný popis systému, jeho základní parametry a principy práce jednotlivých konstrukčních komponent. Všechny parametry jsou fiktivní. Každému parametru byla přiřazena odpovídající střední hodnota.

Ve druhé části kapitoly bylo zpracováno sedm kroků DFMEA analýzy. Každý krok byl zpracován podle příručky FMEA [15]. Cílem dané diplomové práce bylo definovat co nejvíc způsobů, jak zkoumaný systém může selhat a navrhnout případná řešení těchto problémů. Na základě konstrukční dokumentace bylo definováno 31 možných selhání (viz 3. krok DFMEA). Pro každé selhání podle tabulky 9 byl zvolen parametr S. Každá hodnota byla konzultována a upravena podle potřeb práce. V další části analýzy byla definována stávající opatření k prevenci a detekci. Na

základě kombinací parametrů S, O, D byla stanovena priorita opatření AP, která je rozhodující při nasazení nových opatření. V 6. kroku DFMEA analýzy byla navržena řešení některých problémů a další způsoby jejich detekce.

Cílem dané diplomové práce bylo vymyslet a nabídnout řešení některých problémů, nikoliv nasazovat nová nápravní opatření nebo nějakým způsobem měnit konstrukci jednotky. To by vyžadovalo zdlouhavý proces schvalování, který bohužel není možné uskutečnit v rámci diplomové práce. Avšak některá nápravní opatření byla nasazena: rozšířil se seznam školení a kurzů pro zaměstnance, motor se od teď chrání bez ohledu na to v jakém stavu je, k ochraně motoru se používá aretace rotoru, častěji se kontroluje těsnost konstrukčních prvků a hladina oleje, bylo zavedeno štítkování uzlů a barevné označení svorek (princip Poka Yoke), byly zavedeny další kontroly signálů na IO modulech během provozu. Všechna opatření byla navržena a nasazena v souladu s prioritou zavedení nápravních opatření AP.

Na závěr je třeba říct, že se harmonizovaný přístup zásadně liší od předchozí verze. Klade důraz na řešení selhání na různých úrovních a obsahuje podstatné změny rozšiřující realizované analýzy technického selhání. Způsob provedení je více strukturovaný a logičtější při určení priority opatření. Nový přístup k FMEA analýze nutí k důslednému zkoumání možných selhání pohledem řetězců selhání a ke komplexnímu přístupu, což je velkým přínosem. I během zpracování dané diplomové práce bylo zjištěno, že nová metoda je mnohem efektivnější a výsledky jsou adekvátnější.

## 6. LITERATURA

- [1] FMEA podle nové harmonizované příručky AIAG & VDA. *Cems-cz.com* [online]. Certifikace Manažerských Systémů [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.cems-cz.com/skolenie/229-fmea-podle-nove-harmonizovane-prirucky-aiag-vda>
- [2] Hlavní změny v harmonizované příručce FMEA dle AIAG a VDA. *Cems-cz.com* [online]. Certifikace Manažerských Systémů [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.cems-cz.com/blog/217-hlavni-zmeny-v-harmonizovane-prirucce-fmea-dle-aiag-a-vda>
- [3] KOVALOVÁ, Michaela. Diagram rybí kosti / Ishikawa. *Prumysloveinzenyrstvi.cz* [online]. 2018 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.prumysloveinzenyrstvi.cz/sablona-diagram-rybi-kosti-ishikawa/>
- [4] Diagram příčin a následků. *Agenturapoznani.cz* [online]. Agentura poznání [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.agenturapoznani.cz/userFiles/diagram-pricin-a-nasledku.pdf>
- [5] Kontrolní tabulka. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Kontroln%C3%AD\\_tabulka](https://cs.wikipedia.org/wiki/Kontroln%C3%AD_tabulka)
- [6] Regulační diagram. *Agenturapoznani.cz* [online]. Agentura poznání [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.agenturapoznani.cz/userFiles/regulacni-diagram.pdf>
- [7] AIAG-VDA FMEA Software Solution. *Omnexsystems.com* [online]. Omnex Inc. USA, 2022 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.omnexsystems.com/aiag-vda-fmea-software>
- [8] RELYENCE SOFTWARE FOR AIAG & VDA FMEA. *Relyence.com* [online]. Relyence Corporation, 2022 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://relyence.com/products/fmea/aiag-vda-fmea/>
- [9] AIAG VDA 7-Step FMEA. *Apis-iq.com* [online]. APiS North America: APiS Informationstechnologien, 2022 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.apis-iq.com/2020/aiag-vda-7-step-fmea/>
- [10] KRÍŽEK, Michal. APQP jako výzva dneška. *Slideshare.net* [online]. 2014 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/3DEXPERIENCEcz/apqp-jako-vzva-dneka>

- [11] NETOLICKÝ P., MAZÍNOVÁ I. *Plánování kvality produktu v předvýrobních etapách* [online]. Katedra konstruování strojů, Fakulta strojní, Západočeská univerzita v Plzni, 5s. [cit. 10. 12. 2021]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/16385/1/Netolicky.pdf>
- [12] Harmonizovaná FMEA 2019. *Prokvalitu.cz* [online]. Quality Engineering [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.prokvalitu.cz/harmonizovana-fmea-2019/>
- [13] BOHUŠ, Michal. HARMONIZOVANÁ FMEA OČIMA LEKTORA ANEB DOPADY NOVÉ PŘÍRUČKY NA PRAKTICKOU APLIKACI METODY FMEA. *Qmagazín - Internetový časopis o kvalitě* [online]. Katedra managementu kvality, FMT, VŠB-TU Ostrava, 2020, 12 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://dokumenty.vsb.cz/docs/files/cs/6705da07-d8a7-4f62-a1c8-99a969222b5d?prevPage=true>
- [14] AIAG & VDA FMEA. *Quality-one.com* [online]. Clawson: Quality-One International, 2022 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://quality-one.com/aiag-vda-fmea/>
- [15] AIAG & VDA. *Příručka FMEA: Analýza možností vzniku vad a jejich následků*. Česká společnost pro jakost, 2019, 238 s. ISBN 978-80-02-02885-7.
- [16] LUBOŠ, Luboš a Miroslav ČAPÍK. *TRAKČNÍ A POMOCNÉ MOTORY ELEKTRICKÝCH LOKOMOTIV ČSD*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1965, 136 s.
- [17] PAVLÍČEK, Jiří. Elektrická trakce. *Educon.zcu.cz* [online]. Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky FEL ZČU v Plzni, 2005 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2015013101>
- [18] Terminologická databáze. *Nlfnorm.cz* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://nlfnorm.cz/terminologicky-slovník>
- [19] PETRAŠOVÁ, Ivana. *Moderní plánování kvality produktu (APQP) a plán kontroly a řízení*. 2. vydání. Praha: Česká společnost pro jakost, 2008. ISBN 978-80-02-02142-1.
- [20] MSA: Analýza systému měření. *Lean6sigma.cz* [online]. 2022 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://lean6sigma.cz/msa-analyza-systemu-mereni/>
- [21] JAROŠOVÁ, Eva. *Regulační diagramy EWMA* [online]. Škoda Auto Vysoká škola, 2015, 25 s. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/14931311-Regulacni-diagramy-ewma-eva-jarsova-skoda-auto-vysoka-skola.html>
- [22] PEŠKOVÁ, Miluše. *METODY, TECHNIKY A NÁSTROJE MANAGEMENTU KVALITY - PowerPoint prezentace* [online] 2022 [cit. 14. 05. 2022]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/5643010/>

[23] Quality function deployment. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Quality\\_function\\_deployment](https://cs.wikipedia.org/wiki/Quality_function_deployment)

[24] Introduction to Production Part Approval Process (PPAP). *Quality-one.com* [online]. Clawson: Quality-One International [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://quality-one.com/ppap/>

[25] Fáze APQP (Advanced Product Quality Planning). *Thpanorama.com* [online]. 2022 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://cs.thpanorama.com/articles/administracin-y-finanzas/apqp-advanced-product-quality-planning-fases-ejemplo.html>

[26] FMEA. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/FMEA>

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Zkratky:

AC	...	Alternating Current (střídavý proud)
AIAG	...	Automotive Industry Action Group (organizace zlepšující procesy obchodního řetězce v automobilovém průmyslu)
AP	...	action priority (priorita opatření)
APQP	...	Advanced Product Quality Planning (pokročilé plánování kvality produktu)
DC	...	Direct Current (stejnoseměrný proud)
DFMEA	...	Design Failure Mode Effects Analysis (FMEA produktu)
FMEA	...	Failure Mode Effects Analysis (analýza možného vzniku vad a jejich následků)
FMECA	...	Failure Mode Effects and Criticality Analysis (analýza možného vzniku vad, jejich následků a kritičnosti)
IGBT	...	Insulated Gate Bipolar Transistor (Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem)
IO	...	In/Out (vstup/výstup)
LCC	...	Life Cycle Costs (náklady po dobu životnosti)
MASL	...	Metres above sea level (nadmořská výška)
MGU	...	Motor Generator Unit (motorová trakční jednotka)
MSA	...	Measurement System Analysis (analýza systému měření)
MSR	...	Monitoring and System Response (monitorování a odezva systému)
PFMEA	...	Process Failure Mode Effects Analysis (FMEA procesu)
PPAP	...	Production Part Approval Process (proces schvalování dílů do sériové výroby)
QFD	...	Quality Function Deployment (analýza požadavků zákazníků)
RAM	...	Reliability, Availability and Maintainability (bezporuchovost, pohotovost a udržovatelnost)
R&R	...	Repeatability & Reproducibility (opakovatelnost a reprodukovatelnost)
RPM	...	Revolutions per minute (otáčky za minutu)
RPN	...	Risk Priority Number (číslo rizikové priority)
RTG	...	Rentgen (rentgenové záření)
SFM	...	Severity, Frequency, Monitoring (význam, frekvence, monitorování)
SPC	...	Statistical Process Control (statistická analýza procesů)
VCU	...	Vehicle Control Unit (řídící jednotka vozidla)

VDA ... Verband der Automobilindustrie (Svaz německého automobilového průmyslu)

**Symbols:**

D	...	detection (odhalitelnost)	[-]
H	...	high (vysoká priorita opatření)	[-]
L	...	low (nízká priorita opatření)	[-]
M	...	medium (střední priorita opatření)	[-]
O	...	occurrence (výskyt)	[-]
Q	...	quadrant (kvadrant)	[-]
S	...	severity (význam)	[-]



# SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA Č. 1 – DFMEA ANALÝZA .....	74
------------------------------------	----

# **PŘÍLOHA Č. 1 – DFMEA ANALÝZA JE ULOŽENA NA PŘILOŽENÉM CD**



příloha\_1.pdf