

6. ANALÝZA SPOLEHLIVOSTI V ETAPĚ NÁVRHU A VÝVOJE VOZIDLA

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

<p>Budete umět:</p> <ul style="list-style-type: none"> • charakterizovat metodu FMEA/FMECA (analýza způsobů a důsledků poruch, resp. jejich kritičnosti), popsat její přednosti a nedostatky, popsat vstupní údaje pro analýzu, • charakterizovat jednotlivé kroky analýzy FMEA/FMECA, vyhodnotit závěry analýzy, popsat dokumentaci potřebnou pro provádění analýzy, • prakticky aplikovat jednotlivé kroky analýzy FMEA/FMECA na součásti vozidel, vyvodit závěry z kvalitativní a kvantitativní analýzy. 	<p>Budete umět</p>
---	--------------------

Metoda FMEA/FMECA byla vyvinuta v šedesátých letech dvacátého století jako nástroj pro systematickou a vysoce organizovanou analýzu způsobů poruch prvků systému a posouzení jejich důsledků na jednotlivé subsystémy i systém jako celek. Impulsem pro vznik těchto metod byly problémy spojené se zabezpečováním spolehlivosti nových technických systémů, vyznačujících se velikou složitostí, jejichž selhání mohlo vést ke katastrofickým důsledkům značného rozsahu. Poprvé byla metoda použita v agentuře NASA při realizaci projektu kosmického výzkumu APOLLO.



Průvodce studiem

Zamyslete se nyní nad tím, v které etapě životního cyklu vozidla by bylo vhodné zabývat se jeho spolehlivostí.

Z důvodu vysoké ceny silničních a především železničních vozidel by bylo pozdě zjišťovat informace o jejich spolehlivosti až poté, co byla tato vozidla vyrobena. Aby se zabránilo velkým nákladům, vyplývajícím z nespolehlivosti v jejich provozu, je snaha tyto možné problémy spojené s bezporuchovostí a bezpečností systému odhalit již v etapě návrhu a vývoje vozidla. S etapami životního cyklu vozidla jsme se seznámili již v první kapitole. Uvedli jsme, že v etapách koncepce, návrhu a vývoje a výroby vozidla vzniká tzv. vložená spolehlivost vozidla. A právě níže popsaná metoda slouží k včasnému odhalení nedostatků, aby vložená spolehlivost vozidla byla na co nejvyšší úrovni.

6.1 Charakteristika metody FMEA/FMECA



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- charakterizovat indukivní metodu kvalitativní analýzy bezporuchovosti a bezpečnosti FMEA/FMECA, stanovit cíle metody, její přednosti a omezení,
- charakterizovat vstupní údaje pro provádění analýzy (cíle analýzy, popis a členění systému, údaje o prvcích systému).



Výklad

Metoda **FMEA** (Failure Mode and Effect Analysis), tedy Analýza způsobů a důsledků poruch, je strukturovaná, kvalitativní analýza sloužící k identifikaci způsobů poruch systémů, jejich příčin a důsledků. Je-li do analýzy zahrnut i odhad kritičnosti důsledků poruch a pravděpodobnosti jejich nastoupení, jedná se o analýzu způsobů, důsledků a kritičnosti poruch, označovanou jako metoda **FMECA** (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis). Metoda FMECA tak nepředstavuje samostatný způsob analýzy spolehlivosti, ale je pouze logickým rozšířením metody FMEA.

V současnosti patří metoda FMEA/FMECA k nejpoužívanějším metodám prediktivní analýzy spolehlivosti a je využívána v řadě oborů, nejen pro analýzu technických systémů, ale také pro analýzu procesů a software. Metoda je u nás popsána v normě ČSN IEC 812 – Postup analýzy způsobů a důsledků poruch.

□ Charakteristika, cíle a možnosti použití metody

Metoda FMEA/FMECA je metoda indukivní, která provádí kvalitativní analýzu bezporuchovosti a bezpečnosti systému od nižší k vyšší úrovni členění systému a zkoumá jakým způsobem mohou objekty na nižší úrovni selhat a jaký důsledek mohou mít tato selhání pro vyšší úroveň systému. K hlavním cílům metody patří:

- posouzení důsledků a posloupnosti jevů pro každý zjištěný způsob poruchy prvku, s jakoukoliv její příčinou, na různých funkčních úrovních systému,

- určení významnosti nebo kritičnosti každého způsobu poruchy vzhledem k požadované funkci nebo provozuschopnosti systému s uvážením důsledků na bezporuchovost nebo bezpečnost daného procesu,
- klasifikace zjištěných způsobů poruch podle možnosti, jak lze zjistit, diagnostikovat, testovat, nahradit danou součást nebo provádět kompenzační a provozní opatření (oprava, údržba, logistický systém atd.), nebo podle jiných odpovídajících charakteristik,
- odhady ukazatelů významnosti a pravděpodobnosti poruchy, jsou-li k dispozici potřebná data.

Využití metody je především v etapě návrhu a vývoje, kde slouží jako součást přezkoumání návrhu jako tzv. **metoda předběžného varování**, která má zabránit pozdějším problémům vyplývajícím z nespolehlivosti systému. Dále se uplatňuje i v etapě tvorby koncepce a specifikace požadavků, jako nástroj předběžné analýzy rizik, a při modifikacích a modernizacích systému nebo při změnách provozních podmínek jako prostředek identifikace a posouzení důsledků konstrukčních změn a provozních podmínek na bezporuchovost a bezpečnost systému. Metoda je také používána při prokazování, že navrhovaný systém splňuje v oblasti bezporuchovosti a bezpečnosti požadavky norem, předpisů nebo uživatele.

Informace získané prováděním metody FMEA mohou sloužit jako podklad pro návrh konstrukčních změn systému, formulaci požadavků na provedení zkoušek, nebo identifikaci nebezpečných provozních režimů. Výsledky analýzy také poskytují nezbytné informace pro racionální návrh diagnostických postupů a systému údržby.

K možnostem využití a přínosům metody FMEA/FMECA patří:

- poskytnout systematický, přesný a jednotný postup pro pochopení funkcí systému a jeho částí,
- identifikovat všechny potenciálně možné poruchy, určit ty způsoby poruch, které významně ovlivňují očekávaný nebo požadovaný provoz,
- stanovit požadavky na zvýšení spolehlivosti kritických prvků, zálohování, vlastnosti „fail-safe“ návrhu, zjednodušení návrhu, snížení hladin namáhání apod.,
- stanovit požadavky na alternativní řešení, výběr prvků, materiálů, technologií apod.,
- identifikovat poruchy se závažnými až katastrofickými důsledky s možností přezkoumání, revize návrhu,

- poskytnout logický model a podklady pro odhady pravděpodobnosti vzniku poruchových provozních stavů nebo nežádoucích provozních podmínek,
- odhalit kritická místa a kritické prvky návrhu, u nichž mohou vzniknout problémy s bezpečností nebo s právní odpovědností za výrobek nebo odhalit nesoulad s požadavky předpisů nebo zákazníka,
- poskytnout věcné podklady k tomu, aby zkušebním programem bylo možno odhalit potenciální způsoby poruch,
- odhalit provozní cykly (podmínky, situace), při kterých by mohlo dojít k nežádoucím způsobům poruch, nežádoucí degradaci funkcí, a tím umožnit jejich prevenci,
- zaměřit pozornost na klíčové oblasti a prvky řízení jakosti, kontrolu výrobního procesu, prvků logistické podpory apod.
- vyvarovat se pozdějších nákladných modifikací včasnou identifikací nedostatků návrhu,
- stanovit požadavky na sběr údajů pro vývojové, výrobní a provozní zkoušky,
- poskytnout informace pro výběr míst pro preventivní údržbu (údržba zaměřená na bezporuchovost), pro vypracování typických technologických oprav, pro výběr testovaných míst a interních i externích testovacích zařízení (technická diagnostika),
- usnadnit či zdůvodnit stanovení zkušebních podmínek, programů zkoušek, diagnostických postupů apod.,
- poskytnout podklady pro opatření v provozu, vedoucí k eliminaci důsledků poruch (pokud vzniknou), pro návrh alternativních způsobů provozu, změn konfigurace provozu apod.,
- usnadnit způsoby řešení problémů mezi všemi partnery, účastníky kontraktu.

□ Omezení a nedostatky metody FMEA

FMEA je velice účinná metoda analýzy spolehlivosti a bezpečnosti, pokud je aplikována na analýzu prvků, které mohou způsobit poruchu celého systému. Nejúčinnější období její aplikace jsou předvýrobní etapy.

K nevýhodám metody FMEA patří, že může být složitá, pracná a časově náročná v případě komplexních systémů, které mají mnoho funkcí a složených z mnoha komponentů, nebo pokud je aplikována na složitý systém poprvé (nutnost poznání velkého množství informací o systému, konstrukci, funkci, technologii výroby, provozu a provozních podmínkách).

Dalším omezením je skutečnost, že FMEA nezahrnuje důsledky chyb lidského činitele. U velmi složitých a nebezpečných systémů je člověk nejslabším prvkem v systému. Úloha člověka se často nahrazuje rozšířením systému o automatické řídicí, bezpečnostní a softwarové prvky, které sebou ale nesou i zvýšené riziko selhání těchto prvků a celého systému. Pomocí metody FMEA lze zjistit komponenty, které jsou nejcitlivější na nepříznivé vlivy činnosti člověka a naznačit účinné kroky k eliminaci těchto nepříznivých vlivů.

Omezení použití metody způsobují také významně se projevující vlivy provozních podmínek a prostředí. Uvážení těchto vlivů vyžaduje dokonalou znalost charakteristik, práce a reakcí různých komponentů systému na tyto vlivy.

□ **Vstupní informace pro analýzu**

K provedení analýzy metodou FMEA nebo FMECA je nutné podrobně vymezit podmínky jejího provedení a mít k dispozici všechny potřebné vstupní informace. Jsou to:

Účel a cíle analýzy

Musí se přesně uvést, pro jaký účel je analýza prováděna. K cílům a účelům analýzy patří:

- možnost prokázání, že výrobek splňuje požadavky na bezpečnost, pokud tyto požadavky nelze prokázat jiným přijatelným způsobem (např. zkouškou), protože je nepřípustný podle předpisu,
- specifikovat kritické prvky systému z hlediska nepříznivých vlivů důsledků jejich poruchy pro plnění základních funkcí systému,
- prokázat splnění požadavků na spolehlivost před provedením komplexní zkoušek spolehlivosti,
- poskytnout vstupní informace pro návrh optimálního systému technické údržby systému,
- poskytnout vstupní informace pro návrh optimálního systému technické diagnostiky,
- kombinace výše uvedených účelů a cílů, případně jiné účely.

Technický popis systému

Slovní popis konstrukčního uspořádání a použitého technologického řešení systému, doplněný o podrobnou výkresovou dokumentaci, schémata, grafy apod.

Definice funkcí systému a jeho prvků

Obsahuje podrobný výčet (definice) všech důležitých funkcí systému a prvků, které musí plnit a které musí být analyzovány. Funkce jsou definovány tak, aby bylo možné modelovat jejich vzájemné souvislosti, podmíněnost, posloupnost, vazby na provozní podmínky systému. Z definice musí být možné odvodit závažnost důsledků jejich neplnění, možnosti vzájemné oddělitelnosti funkcí apod. Funkce může být pro systém nebo prvek pouze jedna, avšak většinou je funkcí několik a pro každou z nich se provádí účelově zaměřená analýza.

Funkční členění systému

Funkční členění musí korespondovat s předchozím bodem. Specifikuje se, do jakých funkčních subsystémů se systém člení, až do požadované hloubky analýzy. Funkční členění může být shodné nebo podobné konstrukčnímu uspořádání (není pravidlem). Funkční a konstrukční členění je nutné odlišovat, protože výrobek jednoho konstrukčního typu může plnit řadu odlišných funkcí. Funkčnímu členění se pak přizpůsobují také modely spolehlivosti (funkčnosti), které umožňují provedení analýzy spolehlivosti.

Definice rozhraní systému

Jedná se o přesné vymezení hraničních bodů a prvků, kde dochází ke vzájemné interakci se „sousedními“ systémy nebo s vnějším okolím systému. V nich jsou pak vymezeny „okrajové podmínky“ pro analýzu systému. Definice rozhraní má za cíl vyloučit „průniky jevů“ více systémů tak, aby se stejné analyzované jevy (funkce, poruchy atd.) neopakovaly vícekrát v různých systémech.

Údaje o prvcích systému

O každém prvku systému, až do zvolené úrovně, určené požadovanou hloubkou analýzy, musí být k dispozici alespoň tyto informace:

- jednoznačná identifikace prvků – např. čísla výkresů, katalogová čísla, čísla prvků na výkresech a schématech apod.,
- popis funkcí prvků,
- popis možných poruch prvků,
- popis důsledků poruch prvků,
- intenzity (pravděpodobností) jednotlivých způsobů poruch prvků (v případě provedení kvantitativní analýzy),
- zdroj informací o intenzitách (obvykle vyžaduje zadavatel projektu).

6.2 Postup provádění metody FMEA/FMECA



Čas ke studiu: 4 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- charakterizovat jednotlivé kroky analýzy FMEA/FMECA (přípravná část, provedení analýzy, vyhodnocení analýzy),
- orientovat se v dokumentaci pro provádění analýzy (popis funkcí, způsoby a důsledky poruch, hodnocení významnosti nebo kritičnosti poruchy atd.),
- aplikovat jednotlivé kroky analýzy FMEA/FMECA na konkrétní části kolejového vozidla, přehledně vyhodnotit závěry vyplývající z kvantitativní a kvalitativní analýzy.



Výklad

Realizace metody představuje provedení logické posloupnosti kroků, kterou lze rozdělit do tří základních částí:

- přípravná část,
- vlastní analýza FMEA/FMECA jednotlivých prvků systému,
- vyhodnocení analýzy.

Obsah a rozsah každé z těchto částí analýzy je závislý na řadě faktorů a může se pro každý případ lišit formou i obsahem. Neexistuje tedy žádný univerzální nebo závazný návod, který by určoval podrobně a jednoznačně postup analýzy. Platné standardy uvádějí pouze výčet základních principů metody a doporučení k jejímu provádění.

□ Přípravná část analýzy

Obsahem této části analýzy je shromáždění potřebných informací a podkladů, upřesnění cílů analýzy a stanovení základních pravidel pro její provádění. K základním informacím, které jsou nutné k provedení analýzy, patří:

- a) Cíle, termíny a požadovaná hloubka analýzy.
- b) Požadavky na spolehlivost a bezpečnost systému:
 - požadavky vyplývající z technických podkladů,
 - požadavky vyplývající z legislativních podkladů.
- c) Informace o struktuře a funkcích systému:
 - přehled funkcí systému a důsledků jejich selhání,
 - přehled prvků systému a jejich parametrů, úloh a funkcí,
 - struktura a vazebnost systému (uspořádání systému a logika jeho funkcí),
 - úroveň zálohování a podstata záložních systémů,
 - návaznost na jiné systémy (definice rozhraní mezi systémy).
- d) Informace o provozních podmínkách a systému údržby:
 - specifikace podmínek provozu,
 - doba a fáze provozu,
 - systém preventivní a nápravné údržby.
- e) Podmínky prostředí.
- f) Požadavky na využití softwarové podpory analýzy.

Pro potřebu následné analýzy je vhodné na základě těchto informací znázornit analyzovaný systém symbolicky, např. pomocí diagramů. Tyto diagramy mají znázornit všechny strukturální i funkční vztahy mezi jednotlivými prvky systému tak, aby umožňovaly posouzení důsledků poruchy každého jednotlivého prvku na vyšší funkce systému až po nejvyšší úroveň.

Pro vytvoření diagramů je nutné stanovit nejnižší úroveň, která je předmětem sledování. Všechny objekty na této úrovni jsou pak pro potřeby analýzy považovány za dále nedělitelné prvky, které plní jasně definované funkce a mají jednoznačně vymezené způsoby poruch. Těmito prvky mohou být jednotlivé součásti a komponenty, také i agregáty a subsystemy. Při volbě nejnižší úrovně analýzy je třeba brát v úvahu:

- stanovené cíle analýzy a její požadovanou hloubku,
- složitost analyzovaného systému,
- úroveň znalostí o funkcích a způsobech poruch (příp. intenzitách poruch) systému na jednotlivých úrovních jeho struktury,
- specifikovanou nebo zamýšlenou úroveň nápravné a preventivní údržby,
- možnosti symbolického znázornění (modelování) funkcí systému na jednotlivých úrovních jeho struktury,
- možnosti software použitého pro analýzu.

Nejnižší úroveň analýzy musí být zvolena tak, aby na ní bylo možné věrohodně identifikovat funkce jednotlivých prvků, způsoby jejich selhání, při kvantitativním hodnocení i stanovit hodnoty intenzity poruch těchto prvků. V rámci jednoho analyzovaného systému prvek může představovat jak jednotlivou součást, tak i složitý subsystem. Při analýze je pak každý prvek na zvolené úrovni analýzy považován za „černou skříňku“, jejíž vnitřní struktura a funkce nejsou předmětem analýzy.

□ **Vlastní FMEA/FMECA jednotlivých prvků systému**

Při vlastní analýze jsou postupně všechny prvky systému (na zvolené nejnižší úrovni) podrobeny systematickému zkoumání, při kterém se realizují především tyto základní kroky:

- identifikace způsobů poruch prvku, jejich důsledků a pravděpodobných příčin,
- identifikace metod a opatření k detekci a izolaci poruch,

- kvalitativní posouzení významnosti poruch a alternativní opatření.

V případě rozšíření analýzy o kvantitativní hodnocení (FMECA) se provádí ještě následující kroky:

- určení kritičnosti poruch,
- vyhodnocení pravděpodobnosti poruch.

Tento základní rozsah analýzy může být podle potřeby rozšířen o další kroky, v rámci kterých se zjišťují (analyzují) další informace, potřebné pro posouzení spolehlivosti či bezpečnosti systému.

Výstupem FMEA jednotlivých prvků je **kvalitativní hodnocení** úrovně spolehlivosti a bezpečnosti analyzovaného systému v podobě výčtu všech předpověditelných poruch, problémových míst v konstrukci a technologii a jejich důsledků pro funkci systému. Výsledky by měly mít setříděnou podobu, doplněnou o informace o pravděpodobných příčinách poruch, způsobech jejich identifikace apod.

Je-li prováděno i **kvantitativní hodnocení** úrovně spolehlivosti a bezpečnosti systému (FMECA), musí výsledky analýzy zahrnovat také příslušné kvantitativní ukazatele, např. odhadnuté pravděpodobnosti vzniku jednotlivých způsobů poruch, faktory kritičnosti poruch podle zvolených kategorií závažnosti důsledků poruch apod.

□ Vyhodnocení analýzy

Závěry analýzy musí směřovat k přijetí souboru účinných nápravných opatření, zaměřených na odstranění příčin nejzávažnějších typů poruch nebo snížení stupně jejich závažnosti.

Výsledky analýzy se porovnávají s požadavky stanovenými v normách a předpisech (existují-li) nebo s požadavky, stanovenými ve schválených technických podmínkách pro vývoj, výrobu a provoz výrobku. Na základě tohoto porovnání výsledků a dalších poznatků získaných analýzou se navrhnou konkrétní nápravná opatření. Pro každou poruchu a její příčiny se navrhnou taková opatření, která povedou:

- k úplnému odstranění příčin poruchy,
- ke snížení pravděpodobnosti vzniku poruchy pod přípustnou mez,
- ke snížení stupně kritičnosti důsledků poruchy.

Na základě výstupů z analýzy FMEA je možné dále navrhnout:

- zdůvodněný program potřebných zkoušek spolehlivosti kritických prvků,
- účelný systém údržby, zaměřený na predikci vzniku závažných poruch,
- účelný systém technické diagnostiky, zaměřený na včasné odhalení příčin vzniku poruch.

□ Dokumentace FMEA/FMECA

Pro přehlednost a možnost dalšího snadného využití výsledků analýzy, je vhodné jejich průběžné zaznamenávání do pracovních formulářů. Analýza pak bude prováděna systematicky. Obsah a uspořádání pracovního formuláře pro realizaci FMEA/FMECA není předepsáno žádným závazným předpisem, některá doporučení a návrhy jsou součástí norem. Pracovní formulář by měl dle [Holub, 2001] obsahovat zejména následující informace:

Identifikační číslo analyzovaného prvku

Zajišťuje jednoznačnou identifikaci prvku v systému. Vhodné je využití systému identifikace prvků použitý při návrhu systému (např. podle výkresu sestavy). Pro odlišení konstrukčně shodných prvků použitých v různých částech systému je možné vedle identifikačního čísla použít další zpřesňující údaje (např. čísla výrobních výkresů, označení dle katalogu náhradních dílů, označení prvků v blokových diagramech apod.).

Název analyzovaného prvku

Název prvku má korespondovat s názvem použitým ve výrobní dokumentaci tak, aby se zabránilo možným nedorozuměním. S identifikačním číslem musí zajistit naprosto jednoznačnou identifikaci každého prvku.

Popis funkce prvku

Funkce prvku je činnost, prostřednictvím které plní prvek svůj účel. Definují se očekávané a přijatelné způsoby činnosti systému jako celku a základních prvků, z nichž se skládá, charakteristiky činností, které jsou považovány za nepřijatelné a jsou poruchou, chybovou funkcí nebo mezním stavem. Popis funkcí definuje přijatelné činnosti pro všechny požadované nebo stanovené charakteristiky při všech provozních i mimoprovozních stavech,

pro všechna uvažovaná časová období a pro všechny podmínky prostředí. Funkce prvků jsou definovány ve vztahu jak k nadřazenému systému, tak i celému systému. V pracovních formulářích se funkce zapisují výstižným a jednoduchým způsobem.

Součástí definice funkcí je také definování podmínek prostředí a požadavků předpisů. Jasně se definuje prostředí (např. teplota, vlhkost, vibrace), v němž má systém pracovat, včetně jeho vlivu na funkce systému a prvků. Je-li systém obsluhován a řízen člověkem, uvažují se i vlivy spojené s lidským faktorem.

Způsoby poruchy

Způsob poruchy je definován jako jev, jehož prostřednictvím je porucha na prvku pozorována. Zaznamenávají se tedy všechny způsoby, kterými se selhání prvků projeví. Rozsah a komplexnost klasifikace způsobů poruch by měla korespondovat s cíli prováděné analýzy, s její požadovanou hloubkou a charakterem složitosti analyzovaného systému. Rozsah a komplexnost obecné klasifikace způsobů poruch a podrobné klasifikace způsobů poruch podle ČSN IEC 812 je pro srovnání uveden v tab. č. 6.1 a 6.2.

V analýze musí být uvedeny všechny možné způsoby poruch včetně těch, které se jeví jako krajně nepravděpodobné. Kritériem zařazení každého způsobu poruchy do analýzy je předpoklad **možnosti** a **předpověditelnosti** takového způsobu poruchy (bez pravděpodobnosti poruchy).

Tab. č. 6.1: Příklad obecné klasifikace způsobů poruch

Poř. číslo	Způsob poruchy
1	Předčasná činnost
2	Není v činnosti v předepsaném okamžiku
3	Neukončil činnost v předepsaném okamžiku
4	Porucha v průběhu činnosti

Tab. č. 6.2: Příklad podrobné klasifikace způsobů poruch

Poř. číslo	Způsob poruchy	Poř. číslo	Způsob poruchy
1	Porucha celistvosti (lom)	18	Chybné uvedení do provozu
2	Mechanické omezení nebo zaseknutí	19	Nezastavuje
3	Vibrace	20	Nenabíhá
4	Nezůstává v pozici	21	Nespíná
5	Neotevívá	22	Předčasná činnost
6	Nezavírá	23	Zpožděná činnost
7	Porucha v pozici „otevřeno“	24	Chybný vstup (zvýšený)
8	Porucha v pozici „zavřeno“	25	Chybný vstup (snížený)
9	Vnitřní netěsnost	26	Chybný výstup (zvýšený)
10	Vnější netěsnost	27	Chybný výstup (snížený)
11	Je mimo toleranci (nad)	28	Ztráta vstupu
12	Je mimo toleranci (pod)	29	Ztráta výstupu
13	Omylem vyvolaná činnost	30	Zkrat (elektrický)
14	Přerušovaná činnost	31	Přerušování (elektrické)
15	Nesprávná činnost	32	Svod (elektrický)
16	Chybná indikace	33	Zvláštní podmínky podle parametrů systému, provozních podmínek a omezení
17	Omezený průtok (proud)		

Příčina poruchy

Přes induktivní povahu metody, kdy stanovení příčiny poruchy není prioritním cílem analýzy, se v této metodě stanovují všechny pravděpodobné příčiny spojené s každým daným způsobem poruch. Identifikace příčin každého způsobu poruch se provádí proto, aby bylo možné odhadnout zdroj jejich výskytu, aby se odhalily sekundární důsledky a aby bylo možné určit soubor nápravných opatření.

Důsledky poruchy

Kvalitativní (FMEA) nebo kvantitativní (FMECA) analýza důsledků poruch je prioritním cílem metody. Zjišťují, vyhodnocují a zaznamenávají se důsledky všech předpokládaných způsobů poruch na činnost, funkci a stav vlastního prvku systému a na všechny vyšší úrovně systému až po úroveň systému jako celku. Každému důsledku poruchy se pak přiřadí stupeň závažnosti. Rozlišují se tyto důsledky:

- **lokální důsledek** – sledují se důsledky poruchy na vlastní prvek; vyhodnocení lokálních důsledků poskytuje výchozí informace pro vyhodnocení alternativních opatření nebo pro doporučení nápravných opatření,
- **konečný důsledek** – pro posouzení důsledku poruchy prvku na činnost, funkci a stav celého systému je nutné vyhodnotit důsledky každé poruchy na všech nižších úrovních; je nutné uvážit všechny možné kombinaci s dalšími poruchami systému, protože poruchy více prvků s nezávažnými důsledky mohou vyvolat násobnou poruchu katastrofických důsledků.

Metody zjišťování poruch

Je nutné popsat možné způsoby detekce poruch. Tyto informace jsou důležité pro návrh případných preventivních opatření, jako vybavení systému přístroji palubní diagnostiky, nebo návrhy v oblasti údržby systému atp. Zvláštní pozornost je věnována tzv. „skrytým poruchám“, o kterých obsluha není informována systémem signalizace a varování a které svou existencí mohou způsobit selhání systému až v okamžiku, kdy se očekává plnění jeho funkce.

Relativní významnost poruchy

Relativní významnost poruch se posuzuje z hlediska závažnosti jejich důsledků. Systém kategorizace důsledků poruch by měl pokrývat všechny předpověditelné důsledky jednotlivých poruch systému a umožnit jednoznačné zařazení každé poruchy do některé z navržených kategorií. Systém kategorizace důsledků poruch je vždy nutné přizpůsobit konkrétnímu výrobku a podmínkám jeho použití (je nutné rozlišení, zda selhání systému je spojeno pouze se vznikem materiálních škod, nebo může vést k ohrožení života a zdraví lidí).

Příklad uvádí kategorizaci důsledků poruch podle závažnosti, používanou v letectví nebo jaderné energetice:

- *nezávažný důsledek* vyvolá porucha, která nesníží ani jinak neovlivní funkční schopnosti, efektivnost a výkony objektu pod stanovenou a přijatelnou limitní hodnotu,
- *závažný důsledek* vyvolá porucha, která by mohla snížit funkční schopnosti objektu pod přijatelnou limitní hodnotu, ale jejíž důsledek je v provozu obsluhou zvládnutelný,
- *kritický důsledek* vyvolá porucha, která by mohla snížit funkční schopnosti objektu pod přijatelnou limitní hodnotu a mohla by tím přivodit takové zvýšení rizika poruchy, které by mohlo vést až ke katastrofické poruše, pokud by nebyla přijata neprodleně nebo ve stanovené době odpovídající nápravná opatření,
- *katastrofický důsledek* vyvolá porucha, která by mohla mít za následek vážné poškození objektu takové povahy, že by tím vylo vyloučeno bezpečné ukončení funkce objektu, nebo která by mohla vést k újmě na zdraví nebo ke ztrátám či ohrožení života lidí nebo k velké hmotné či jiné škodě.

Při posouzení významnosti poruch je vhodné posoudit realizaci alternativních opatření k předcházení důsledků poruch nebo k omezení tohoto důsledku. Opatření mohou zahrnovat např.:

- změnu konfigurace,
- použití záložních prvků,
- alternativní způsoby provozu,
- monitorovací, diagnostické nebo signalizační zařízení.

V případě provádění analýzy s kvantitativním hodnocením (FMECA) jsou do pracovního formuláře zaznamenány také následující informace:

Pravděpodobnost poruchy prvku

Pro každý prvek je zde uvedena pravděpodobnost výskytu každého předpokládaného způsobu poruchy. Odhad pravděpodobnosti může být proveden např.:

- z výsledků sledování provozní spolehlivosti prvku,
- na základě provedených zkoušek spolehlivosti,
- s využitím výsledků sledování provozní spolehlivosti konstrukčně podobných prvků,

- expertním odhadem s využitím znalostních databází apod.

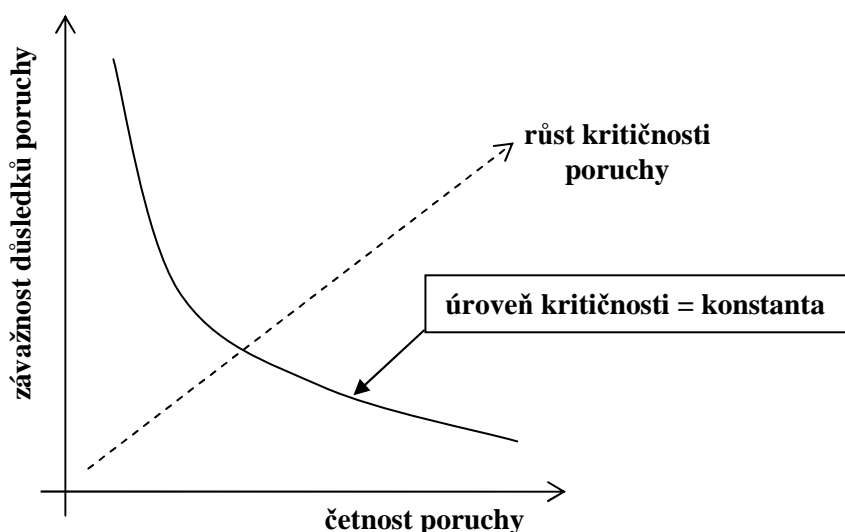
Tyto informace slouží jako vstupní údaje pro hodnocení kritičnosti poruch a pro výpočet pravděpodobností jednotlivých způsobů poruch celého systému a jeho částí.

Kritičnost poruchy

Kritičnost poruchy označuje ohodnocení závažnosti důsledku dané poruchy při uvažování její četnosti. Obecně platí „inverzní“ vztah mezi četností výskytu poruch (pravděpodobností jejího vzniku) a závažností (kritičností) důsledku poruch. Je-li pravděpodobnost nastoupení poruchy extrémně nízká, pak i v případě velice závažných důsledků může mít tato porucha jen malou kritičnost (viz obr. č. 6.1).

Hodnocení kritičnosti poruch lze provádět např. grafickou metodou, s využitím síťových grafů kritičnosti, nebo přesnější početní metodou, např. s využitím faktorů kritičnosti.

Uvedené principy hodnocení kritičnosti jsou pak využívány pro specifikaci požadavků na spolehlivost (bezpečnost) systému a při ověřování jejich splnění. Požadavky jsou stanovovány pro každou kategorii poruch jako nejvyšší přípustná pravděpodobnost nastoupení poruchy. Kontrola splnění zadaných požadavků se provádí s využitím metody FMEA pro identifikaci všech poruchových stavů a kategorizaci závažnosti jejich důsledků, metodou FMECA se pak určí pravděpodobnost nastoupení těchto poruchových stavů a zjištěné hodnoty se porovnají s hodnotami požadovanými.



Obr. č. 6.1: Hodnocení kritičnosti poruch

Kvantitativní vyjádření kritičnosti s využitím faktorů kritičnosti je možné např. podle následujícího postupu:

$$C = (\pi_1 \cdot \pi_2 \cdot \pi_3 \cdot \dots \cdot \pi_N)^{\frac{1}{N}} \quad (6.1)$$

kde: π_i jsou váhové faktory vyjadřující vliv jednotlivých důsledků poruchy

Tyto faktory vyjadřují vliv: třídy poruchy, důsledku poruchy, snadnosti detekce poruchy, relativní četnosti poruchy apod.

Další z metod pro výpočet kritičnosti s využitím základní (generické) intenzity poruch a opravnými faktory pro skutečné podmínky používání výrobku. Faktor kritičnosti je pak dán:

$$C = \sum_1^N (\beta \cdot \alpha \cdot K_E \cdot K_A \cdot \lambda_G \cdot t \cdot 10^6)_i \quad (6.2)$$

kde: N je počet prvků v systému,

β je podmíněná pravděpodobnost, že způsob poruchy bude mít kritický následek,

α je relativní poměr počtu poruch daného typu ke všem poruchám,

λ_G je intenzita všech způsobů poruch (počet poruch/ 10^6),

t je doba provozu objektu

K_E je opravný faktor vlivu rozdílnosti provozních podmínek,

K_A je opravný faktor vlivu rozdílnosti provozního namáhání.

Příklad 6.1.

Pro vybrané celky podvozku tramvajového vozu typu T3 proveďte kvalitativní analýzu způsobů důsledků poruch (metoda FMEA) a kvantitativní analýzu způsobů, důsledků a kritičnosti poruch (metoda FMECA).

Analýza bude provedena s využitím software společnosti RELIASOFT® - produktu *Xfmea Standard* (demoverze produktu je volně dostupná na adrese www.reliasoft.com).

Dle získaných informací o provozní spolehlivosti celků podvozku a souboru opatření při provádění údržby byla stanovena nejnižší úroveň dekompozice systému pro provádění analýzy. Dělení systému je uvedeno v tab. č. 6.3:

Tabulka č. 6.3: Dekompozice systému – podvozek

Systém:	Tramvajový vůz T3
Subsystém:	Podvozek
Číslo celku	Název celku
1	Podélník
2	Motorový příčnick
3	Dvojkolí s převodovou skříní
4	Kolébka
5	Kardanový kloub
6	Trakční motor
7	Čelist'ová brzda
8	Elektromagnetická brzda kolejnicová
9	Mechanický pískovač
10	Plechové blatníky
11	Mazání okolků

Pro provádění kvantitativní analýzy způsobů, důsledků a kritičnosti poruch byl ze získaných údajů provozní spolehlivosti provozovatele vozidel proveden odhad parametrů Weibullova rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny (W2P), náhodnou veličinou je kilometrický proběh vozidla mezi poruchami. Zjištěné parametry jsou uvedeny v tabulce č. 6.4.

Tabulka č. 6.4: Parametry Weibullova rozdělení náhodné veličiny

Celek	Parametry rozdělení W2P	
	m (-)	l_0 (km)
Kolo	2,0687	133 726
Trakční motor	1,0747	158 953
Čelist'ová brzda	2,1818	133 911

Analýza **FMEA** bude prováděna s využitím projektu „*Design FMEA*“ uvedeného produktu. Klasifikace jevů souvisejících s poruchami (závažnost poruchy, výskytu poruchy, možnosti detekce poruchy atd.) je uvedena v tabulkách č. 6.5, 6.6 a 6.7.

Tabulka č. 6.5: Klasifikace výskytu poruchy

č.	Výskyt poruchy	č.	Výskyt poruchy
1	téměř nikdy	6	střední
2	velice slabý	7	mírně zvýšený
3	velice mírný	8	vysoký
4	mírný	9	velmi vysoký
5	nízký	10	téměř jistý

Tabulka č. 6.6: Klasifikace detekce poruchy

č.	Výskyt poruchy	č.	Výskyt poruchy
1	téměř jistá	6	nízká
2	velmi vysoká	7	mírná
3	vysoká	8	velice mírná
4	mírně zvýšená	9	velice slabá
5	střední	10	téměř nemožná

Tabulka č. 6.7: Klasifikace závažnosti poruchy

č.	Druh poruchy dle důsledku	Popis poruchy
1	žádný důsledek	žádný důsledek na objektu nebo jeho činnostech
2	velmi nepatrný důsledek	občas nezásadní porucha
3	nepatrný důsledek	nezásadní porucha většinu času
4	menší důsledek	stálá nezásadní porucha
5	mírný důsledek	nezásadní část potřebuje opravu
6	významný důsledek	nezásadní část je neprovozoschopná
7	větší důsledek	subsystém je neprovozoschopný
8	krajní důsledek	system je neprovozoschopný, ale bezpečný
9	závažný důsledek	potenciální nebezpečný důsledek, přerušením provozu lze zabránit ohrožení bezpečnosti
10	nebezpečný důsledek	náhlá porucha ohrožující bezpečnost systému

Pro analýzu **FMECA** bude použit projekt „*MIL STD 1629A*“ je nutné klasifikovat také následující jevy spojené se vznikem poruchy: relativní četnost příčiny poruchy (číselná hodnota 0 – 1), závažnost poruchy (číselná hodnota 0 – 1), pravděpodobnost poruchy (tab. č. 6.8) a třída závažnosti (tab. č. 6.9).

Tabulka č. 6.8: Klasifikace pravděpodobnosti poruchy

č.	Pravděpodobnost poruchy
1	extrémně nepravděpodobná
2	nepatrná
3	občasná
4	poměrně pravděpodobná
5	frekventovaná

Tabulka č. 6.9: Třída závažnosti poruchy

č.	Třída	Popis
1	IV – vedlejší	porucha způsobuje neplánovanou údržbu, nemá vliv na bezpečnost
2	III – mezní	porucha může způsobit drobná zranění, menší poškození systému
3	II – kritická	porucha může způsobit vážná zranění, velké poškození systému
4	I – katastrofická	porucha může způsobit smrt, ztrátu systému

Vstupní údaje pro analýzu FMEA/FMECA

1. Definování hierarchie systému a jeho prvků,
2. Definování funkcí prvků,
3. Určení parametrů rozdělení bezporuchovosti prvků (kvantitativní analýza)
4. Určení způsobů poruch, důsledků a příčin poruch a jejich klasifikace,
5. Hodnocení výskytu a detekce příčiny poruchy:
 - počáteční – pro případ neprovádění preventivních opatření k zamezení vzniku poruchy,
 - revidovaný – v případě provádění preventivních opatření k zamezení vzniku poruchy,
5. Návrh kontrol pro prevenci nebo detekci poruchy, návrh opatření k odstranění následků poruchy.

Pro možnost vyhodnocení analýzy FMEA je určována relativní významnost poruchy:

- Risk Priority Number (RPN):

$$RPN = ES \cdot CO \cdot CD \quad (6.3)$$

kde: ES je závažnost důsledku poruchy,
 CO je výskyt příčiny poruchy,
 CD je možnost detekce příčiny poruchy.

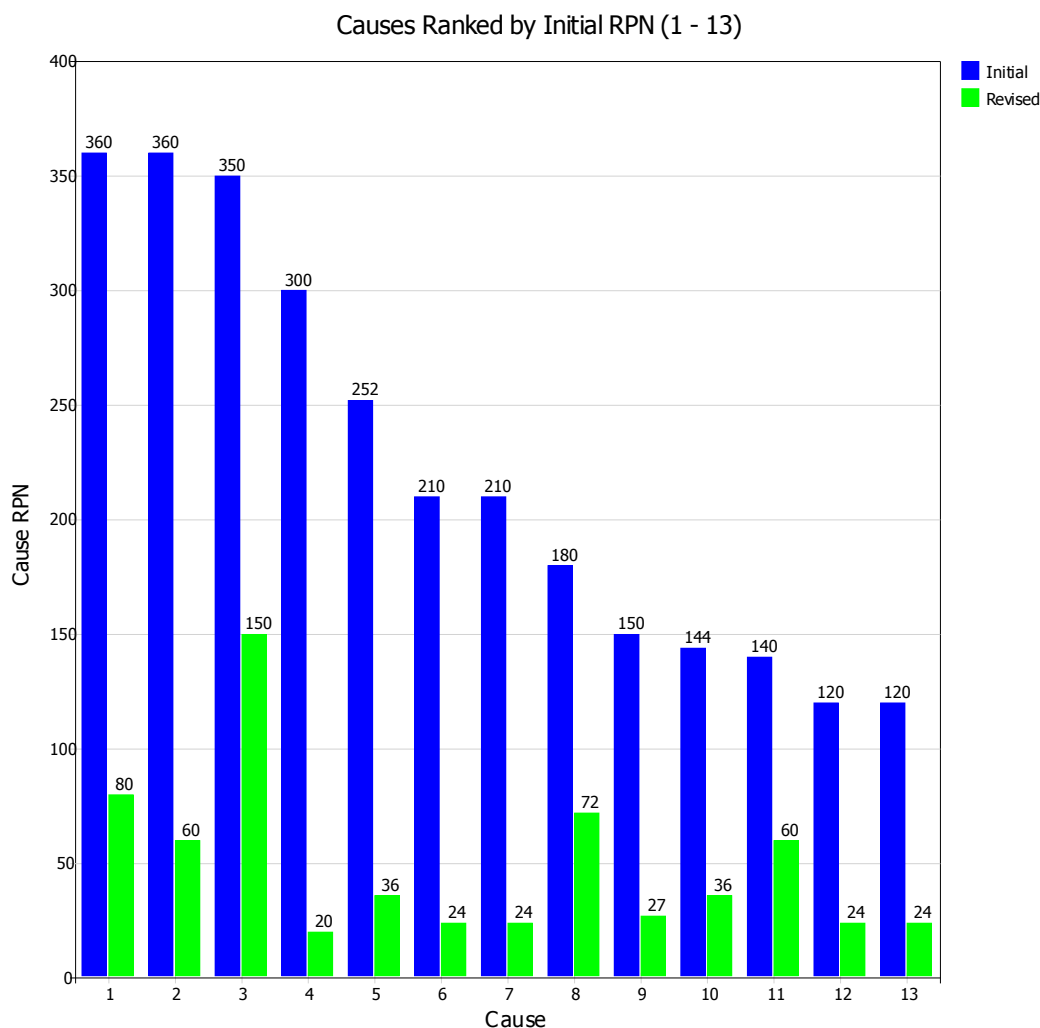
Pro možnost vyhodnocení analýzy FMECA je určována kritičnost poruchy:

- kritičnost poruchy (C):

$$C = IU \cdot RU \cdot PL \quad (6.4)$$

kde: IU je pravděpodobnost poruchy prvku,
 RU je relativní četnost výskytu příčiny poruchy,
 PL je závažnost důsledku poruchy.

Následující obrázek a matice zobrazují výstup z provedených analýz FMEA a FMECA pro vybrané konstrukční celky uvedeného podvozku.



Příčiny poruchy seřazené dle počáteční relativní významnosti (RPN)

- 1: Prasknutí nebo sesmeknutí disku kola (Kolo)
- 2: Pootočení, sesmeknutí nebo prasknutí obruče. (Kolo)
- 3: Degradace pryžové vložky (porucha vypružení). (Kolo)
- 4: Značné opotřebení jízdního obrysu obruče kola. (Kolo)
- 5: Zadření valivých ložisek rotoru. (Trakční motor)
- 6: Proražení izolace vinutí statoru. (Trakční motor)
- 7: Proražení izolace vinutí rotoru (Trakční motor)
- 8: Porušení izolace, přeskok, nerovnosti komutátoru (Trakční motor)
- 9: Přerušení adhezivního valení dvojkolí při jeho zablokování brzděním. (Kolo)
- 10: Zlomení, zaseknutí nebo značné opotřebení kartáčů sběrného ústrojí. (Trakční motor)
- 11: Porucha elektromagnetického brzdíče - čelisti neodlehnu. (Čelistová brzda)
- 12: Velké opotřebení bubnu brzdy. (Čelistová brzda)
- 13: Velké opotřebení nebo deformace brzdového obložení čelistí brzdy. (Čelistová brzda)

Obr. č. 6.2: Výstup z analýzy FMEA – relativní významnost poruchy

Modré sloupce v grafu analýzy FMEA představují počáteční relativní významnost poruchy (v případě, že nejsou prováděna preventivní opatření). Je zřejmé, že nejvyšší hodnotu RPN mají ty příčiny poruchy, které mohou způsobit vykolejení podvozku nebo vozidla a tím ohrozit bezpečnost provozu.

Zelené sloupce v grafu představují tzv. revidovanou významnost poruchy (jsou-li prováděna preventivní opatření). Je patrné, že zavedením preventivních opatření dojde ke značnému snížení významnosti poruchy u všech celků. Nejvyšší hodnotu RPN má degradace pryžové vložky, vyplývající z omezených možností detekce této poruchy.

Výstup analýzy FMEA uvedený na obr. č. 6.2 je mimo analýzy relativní významnosti poruch také dobrým vodítkem pro volbu programu preventivní údržby (zobrazuje, u kterých prvků má, či nemá preventivní údržba smysl).

Výsledky kvantitativní analýzy FMECA lze znázornit s využitím tzv. matice kritičnosti (tab. č. 6.10), která uvádí vztah mezi kritičností poruchy a závažností jejího výskytu. Kritičnost jednotlivých poruch je dána rozmístěním v jednotlivých barevně rozlišených polích matice.

V uvedeném případě (bez prováděných preventivních opatření) je zřejmé, že nejkritičtější poruchou je mezní opotřebení jízdního obrysu (má za následek vykolejení podvozku). Naproti tomu prasknutí nebo sesmeknutí obruče má stejnou (katastrofickou) závažnost, přesto kritičnost této poruchy není tak značná z důvodu nižší četnosti jejího výskytu.

Tabulka č. 6.10: Výstup z analýzy FMECA - matice kritičnosti

vysoká (←-----→) HODNOTA KRITIČNOSTI (C) NÁRŮST KRITIČNOSTI (←-----→)	0,048				- Značné opotřebenění jízdního obrysu obruče kola. (0,049)
	0,043				- Degradace pryžové vložky (porucha vypružení). (0,039)
	0,038				
	0,033		- Velké opotřebenění nebo deformace obložení brzdových čelistí. (0,031)		
	0,028				
	0,023	- Zlomení, zaseknutí nebo opotřebenění kartáčů sběrného ústrojí. (0,023) - Porušení izolace, opálení, nerovnosti komutátoru. (0,023)	- Zadření valivých ložisek rotoru. (0,02)		
	0,018				
	0,013		- Proražení izolace vinutí statoru (0,01) - Proražení izolace vinutí rotoru. (0,01)		
	0,008	- Velké opotřebenění bubnu brzdy. (0,004)			- Pootočení, sesmeknutí nebo prasknutí obruče. (0,005) - Prasknutí nebo sesmeknutí disku kola. (0,005)
	0,003	- Porucha elektromagnetického brzdíče - čelisti neodlehnu. (0,003)			
nízká	Kategorie IV - Vedlejší	Kategorie III - Mezní	Kategorie II - Kritická	Kategorie I - Katastrofická	

RŮST KRITIČNOSTI



KLASIFIKACE ZÁVAŽNOSTI
(RŮST ZÁVAŽNOSTI ----->)



Shrnutí kapitoly

Metoda **FMEA** (Failure Mode and Effect Analysis) představuje analýzu způsobů a důsledků poruch. Metoda **FMECA** je analýza způsobů, důsledků a kritičnosti poruch.

Metoda FMEA/FMECA k nejpoužívanějším metodám **prediktivní analýzy spolehlivosti** a je využívána pro analýzu technických systémů, analýzu procesů a software.

K **účelům analýzy** patří: prokázání splnění požadavků na bezpečnost, specifikace kritických prvků systému, splnění požadavků na spolehlivost, poskytnutí informací pro optimální systém údržby, resp. technické diagnostiky atd.

Realizace metody představuje provedení logické posloupnosti kroků, složenou ze tří částí: **přípravná část, vlastní analýza FMEA/FMECA jednotlivých prvků systému, vyhodnocení analýzy.**

Kvantitativní metoda **FMEA** hodnotí poruchy podle **relativní významnosti poruch**. Kvantitativní metoda **FMECA** využívá pro hodnocení poruch **kritičnosti poruch**.



Kontrolní otázky

- 6.1. Co znamená metoda FMEA/FMECA a k jaký je účel jejího použití?
- 6.2. Co patří k cílům a účelům metody FMEA/FMECA?
- 6.3. Z jakých fází se skládá analýza FMEA/FMECA a co je jejich obsahem?
- 6.4. Podle čeho se kategorizují poruchy u kvalitativní metody FMEA a u kvantitativní metody FMECA?
- 6.5. Jak lze graficky znázornit výsledky metody FMEA/FMECA?



Další zdroje

- [ČSN IEC 812] ČSN IEC 812 Metody analýzy spolehlivosti systémů – Postup analýzy způsobů a důsledků poruch (FMEA).
- [Holub, 2001] Holub, R.; Vintr, Z.: Spolehlivost letadlové techniky (elektronická učebnice). Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2001.
- [Mykiska, 2004] Mykiska, A.: Bezpečnost a spolehlivost technických systémů. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004.
- [Mykiska, 1995] Mykiska A.(edit.): Podstata a možnosti využívání metody FMEA. Sborník 1. semináře. ČVUT FS a ČSS, Praha. 1995.
- [Reliasoft, 2005] Reliasoft Corporation: ReliaSoft's Xfmea Version 4. Software Training Guide. Tucson: Reliasoft Corporation, 2005.
- [Daimler, 2001] Analýza možností způsobů a důsledků závad (FMEA). Příručka. Daimler Crysler Corpor., Ford Motor Comp., GMC. 3.vydání 2001. (české 2001)